

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL –
PPGECC

CAROLINA LONDERO

DOSAGEM DE CONCRETO ECOLÓGICO COM BASE EM EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS

CURITIBA
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL –
PPGECC

CAROLINA LONDERO

DOSAGEM DE CONCRETO ECOLÓGICO COM BASE EM EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção de título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Nayara Soares Klein

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA
2016

Londero, Carolina

Dosagem de concreto ecológico com base em estudo de
empacotamento de partículas / Carolina Londero. – Curitiba, 2016.
151 f. : il.; tabs., grafs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Nayara Soares Klein

Coorientador: Wellington Mazer

Bibliografia: p. 119-126

1. Concreto. 2. Empacotamento de partículas. 3. Sílica de
casca. I. Klein, Nayara Soares. II. Mazer, Wellington. III. Título.

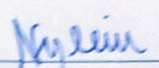
CDD 620.136

TERMO DE APROVAÇÃO

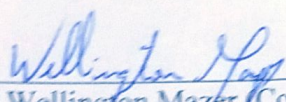
CAROLINA LONDERO

DOSAGEM DE CONCRETO ECOLÓGICO COM BASE EM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

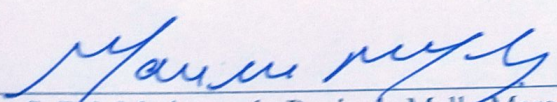
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela banca examinadora formada pelos professores:



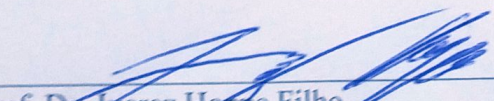
Prof. Dra. Naylor Soares Klein (Orientadora)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. Wellington Mazer (Coorientador)
Departamento Acadêmico de Construção Civil da UTFPR.



Prof.ª Dr.ª Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho
Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias
Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Curitiba, 29 de abril de 2016.

AGRADECIMENTOS

Talvez não existam palavras suficientes que me permitam agradecer a todos aqueles que fizeram parte desta etapa da minha vida. Nada do que foi conquistado seria possível sem a participação de inúmeras pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho. A todos quero prestar os meus sinceros agradecimentos.

Às empresas Concrebras, da Cia. de Cimento Itambé, e BASF pela doação dos materiais e do aditivo superplastificante utilizados nessa pesquisa.

Aos técnicos de laboratório e toda à equipe do LAME/DCC, LAMIR e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela contribuição na execução dos ensaios deste trabalho.

À todos os professores das disciplinas que tive o prazer de cursar durante o mestrado, me incentivando a seguir estudando e me profissionalizando.

Ao Prof. Dr. Welington Mazer por coorientar este trabalho, e por todo o auxílio na execução dos ensaios mecânicos.

À estimada Prof^a. Dr^a. Nayara Soares Klein que compartilhou sua experiência e conhecimentos, dedicando seu valioso tempo para orientar cada etapa deste trabalho. Obrigada pela confiança depositada em mim, e pelo seu olhar crítico e construtivo que foram fundamentais para definir os rumos dessa pesquisa.

Aos colegas da sala 28, pelos momentos de estudos, por toda a ajuda com os trabalhos mais pesados, pelas brincadeiras e discussões capciosas. Obrigada pelos sorrisos, pelos laços que concretizamos e por todo o apoio que recebi de vocês nessa caminhada.

Aos meus parceiros de ensaios, artigos e trabalhos. Ícaro e Lauri, obrigada pelo companheirismo e pelos momentos de descontração, vocês foram essenciais para a realização dessa pesquisa.

Às minhas amigas Larissa, Camila, Carla, Juliana, Sarah e Lígia pelas alegrias e tristezas compartilhadas. Vocês são incríveis! Obrigada pelas inúmeras risadas, abraços, caronas, pela amizade sincera e por estarem sempre ao meu lado, mesmo quando distantes. A amizade de vocês é para a vida toda.

Aos meus pais, Dari e Joseane, pelo exemplo de vida, pelo imenso carinho e apoio incondicional durante todos os momentos, mesmo eu estando tão distante de casa. Eu sei que não foi fácil, mas sem vocês nada disso seria possível. Agradeço também ao meu irmão Gabriel, e demais familiares por todo amor e alegria compartilhados.

A Deus por todas as bênçãos, pela coragem e força para vencer todas as batalhas.

“O tempo dura bastante para aqueles que sabem aproveitá-lo”

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

As questões ambientais que envolvem a produção de concreto vêm sendo muito estudadas, uma vez que o consumo elevado de cimento Portland causa impactos ambientais. A produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, geradas por processos industriais no mundo, necessitando também de um alto consumo energético. Uma forma de amenizar isso é investir no produto final, o concreto, consolidando técnicas que envolvam a produção de composições ambientalmente sustentáveis. A redução do consumo de cimento consiste em uma alternativa interessante, principalmente quando se associa esta à utilização de um subproduto pozzolânico, como a sílica de casca de arroz. Por esta adição ser um resíduo, é importante que seja prevista a sua destinação correta. No concreto, em substituição parcial do cimento, esse material pode promover o refinamento dos poros e a consequente alteração das propriedades mecânicas e de durabilidade. Por conseguinte, o presente trabalho tem por objetivo utilizar um método de dosagem baseado em técnicas de empacotamento de partículas para dosar, produzir e avaliar as propriedades de um concreto ecológico, cujo consumo de cimento Portland tenha sido reduzido por consequência da aplicação do método de dosagem. Foram realizados estudos de otimização dos agregados e de materiais finos (sílica de casca de arroz e pó de quartzo) para reduzir a quantidade de vazios no concreto e substituir o cimento Portland. As propriedades avaliadas, no estado fresco, foram a consistência, através de *slump test*, e a massa específica. No estado endurecido, foram estudadas as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e massa específica. Além disso, foram executados ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade, resistividade elétrica e módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassom. Estes ensaios estão associados à durabilidade do concreto. As propriedades do concreto ecológico foram, então, comparadas com as obtidas para um concreto convencional. Como resultado do estudo, foi possível produzir dois concretos, cujos consumos de cimento foram reduzidos em 115 kg/m³ (Concreto Ecológico A) e 163 kg/m³ (Concreto Ecológico B). No estado fresco, ambos apresentaram consistência seca, sendo necessário acrescentar aditivo superplastificante e alterar a quantidade de golpes para o adensamento, tendo em vista a elevada compacidade do esqueleto granular. Entretanto, o Concreto Ecológico B apresentou resistência à compressão, aos 28 dias, de 31,0 MPa, estatisticamente equivalente ao concreto de referência que alcançou 35,2 MPa, enquanto que o Ecológico A resultou em 54,1 MPa. Tendências similares foram observadas para o ensaio de resistência à tração. Os ensaios de durabilidade demonstraram baixa porosidade dos concretos ecológicos em relação ao de referência. Por fim, os concretos ecológicos se apresentaram mais caros que o convencional devido ao valor elevado das adições, porém ambos representaram economia de cimento, devido à redução no consumo.

Palavras-chave: Concreto ecológico. Empacotamento de partículas. Sílica de casca de arroz. Substituição parcial de cimento Portland.

ABSTRACT

Environmental issues evolving cement production have been widely studied, since the high consumption of Portland cement causes environmental impact. Its production is responsible for about 7% of carbon dioxide emissions (CO₂) in the atmosphere, generated by industrial processes in the world, also requiring high energy consumption. One way to mitigate this situation is to invest in the final product, concrete, consolidating cementing techniques that involve the production of eco-friendly compositions. The reduction in cement consumption provides an interesting alternative, particularly when this is associated with the use of a pozzolanic by-product, such as rice husk ash. As this admixture is a residue, it is important to predict its correct destination. In concrete, as a replacement for cement, this material can promote pore refinement and modifications of mechanical and durability properties. Therefore, this study aims to use a design method based on particle packing techniques to dose, produce and evaluate the properties of an ecological concrete, which Portland cement consumption has been reduced as a result of the application of the method. Optimization studies of aggregates and fine materials (rice husk ash and quartz powder) were performed to reduce the amount of voids in the concrete and replace Portland cement. The properties evaluated in fresh concrete were consistency through slump test, and density. In the hardened condition, the compressive strength properties were evaluated, like the tensile strength by diametrical compression and density. Furthermore, it was performed tests to evaluate water absorption and capillarity, electrical resistivity and dynamic modulus of elasticity by ultrasound. These assays are associated with the durability of concrete. The properties of ecological concrete were then compared with those obtained for a conventional concrete. As a result of the study, it was possible to produce two concretes, whose cement consumption was reduced in 115 kg/m³ (Ecological Concrete A) and 163 kg/m³ (Ecological Concrete B). In the fresh condition, both presented dry consistency, being necessary to add a superplasticizer. In addition, due to a high packability of the granular skeleton, the concrete densification was complicated, so it was needed to change the amount of strokes to compaction. However, the Ecological Concrete B presented compressive strength at 28 days, of 31.0 MPa, statistically equivalent to the reference concrete which reached 35.2 MPa, while the Ecological Concrete A resulted in 54.1 MPa. Similar tendencies were observed for the tensile strength test. The durability tests showed low porosity of the ecological concretes in relation to the reference. Finally, the ecological concretes performed more expensive than conventional due to the large amount of additions, but both represented cement savings due to reduction in its consumption.

Keywords: *Ecological concrete. Particle packing. Rice husk ash. Portland cement partial replacement.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
NOTAÇÕES E SÍMBOLOS.....	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 CONCRETO ECOLÓGICO	6
2.1.1 Cimento Portland	6
2.1.2 Adições minerais	11
2.1.3 Agregados	13
2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	14
2.2.1 Modelos de empacotamento de partículas	16
2.2.2 Métodos para obtenção de curvas granulométricas ideais	17
2.2.3 Modelo CPM.....	18
2.2.4 Modelo CIPM	23
2.2.5 Método para otimização dos materiais que compõem pasta.....	25
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO ECOLOGICO	28
2.3.1 Propriedades mecânicas	28
2.3.2 Durabilidade.....	30
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1 MATERIAIS	39
3.1.1 Materiais finos.....	39
3.1.2 Agregados	41
3.1.3 Aditivo superplastificante	43
3.2 ESTUDO DE AGREGADOS	44
3.2.1 Avaliação analítica para otimização dos agregados.....	45
3.2.2 Avaliação experimental para otimização dos agregados	48
3.3 ESTUDO DE MATERIAIS FINOS	51
3.3.1 Determinação da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos	52
3.3.2 Estudo analítico para otimização da pasta do concreto ecológico	53

3.4	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	54
3.4.1	Dosagem e produção do concreto de referência	55
3.4.2	Método de dosagem do concreto ecológico	57
3.5	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E ESTUDOS COMPLEMENTARES	64
3.5.1	Ensaio em estado fresco	64
3.5.2	Ensaio mecânico	65
3.5.3	Ensaio de durabilidade.....	65
3.5.4	Análise de custos.....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	ESTUDO DE AGREGADOS	68
4.1.1	Avaliação analítica para otimização dos agregados	68
4.1.2	Avaliação experimental para otimização dos agregados	73
4.2	ESTUDO DE MATERIAIS FINOS	78
4.2.1	Determinação da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos	78
4.2.2	Estudo analítico para otimização da pasta do concreto ecológico	80
4.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS ECOLÓGICOS	81
4.3.1	Otimização da composição do esqueleto granular	83
4.3.2	Otimização da composição da pasta	84
4.3.3	Concreto Ecológico A	86
4.3.4	Concreto Ecológico B	91
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E ESTUDOS COMPLEMENTARES	93
4.4.1	Ensaio em estado fresco	93
4.4.2	Massa específica do concreto endurecido e ensaios mecânicos.....	97
4.4.3	Ensaio de durabilidade.....	102
4.4.4	Análise de custos.....	111
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CPM.....	127
	APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CIPM	132
	APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	139
	APÊNDICE D – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO TRAÇO ECOLÓGICO	143
	APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dados da produção e consumo de cimento Portland no Brasil	7
Figura 2 – Desenvolvimento da temperatura em concretos de cimento Portland comum (consumo de cimento indicado na figura)	9
Figura 3 – Continuidade sólida de um corpo granular	19
Figura 4 – Efeitos de interação das partículas	20
Figura 5 – Regiões porosas entre os aglomerados indicadas pela letra <i>P</i>	23
Figura 6 – Comportamento de relação de vazios (<i>u</i>) e concentração de sólidos (ϕ) devido à variação da relação a/s	27
Figura 7 – Efeito do consumo de cimento na resistividade do concreto	34
Figura 8 – Esquema para determinação da resistividade pelo método de Wenner	35
Figura 9 – Tipos de transmissão de ondas	36
Figura 10 – Relação entre a porosidade e a velocidade de pulso ultrassônico	37
Figura 11 – Planejamento experimental	38
Figura 12 – Curvas granulométricas dos materiais finos utilizados	40
Figura 13 – Imagens de MEV das adições minerais com ampliação de 5000x: (a) Sílica de casca de arroz; (b) Pó de quartzo	41
Figura 14 – Curva granulométrica dos agregados e zonas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009)	42
Figura 15 – Fluxograma das etapas do estudo de agregados	44
Figura 16 – Fluxograma das etapas do estudo de materiais finos	51
Figura 17 – Diagrama de dosagem para o traço de referência	55
Figura 18 – Processo cíclico de dosagem de concreto ecológico	57
Figura 19 – Volume ocupado pelas partículas em relação à quantidade de água	61
Figura 20 – Relação experimental entre <i>CSF</i> e resistência à compressão do concreto aos 28 dias	63
Figura 21 – Curvas granulométricas desenvolvidas a partir dos modelos	69
Figura 22 – Densidades de empacotamento dos conjuntos granulares	70
Figura 23 – Curvas granulométricas com as 10 classes de agregados (0,15 – 19 mm)	71
Figura 24 – Verificação experimental dos resultados teóricos para os conjuntos granulares produzidos com a areia normal do IPT	73

Figura 25 – Índice de vazios obtidos para as combinações dos agregados utilizados na produção do concreto ecológico (brita 1, brita 0 e areia)	75
Figura 26 – Curvas granulométricas elaboradas pelo modelo de Funk e Dinger e através da proporção experimental ideal (20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia)	77
Figura 27 – Concentração de sólidos (ϕ_{exp}) e relação de vazios (u) do cimento (CPII-F), pó de quartzo (PQ) e sílica de casca de arroz (SCA)	78
Figura 28 – Correlação entre finura e densidade de empacotamento (ϕ_{exp})	79
Figura 29 – Variação do abatimento do concreto em função do acréscimo do aditivo superplastificante no Concreto Ecológico A	89
Figura 30 – Variação do abatimento do concreto em função do acréscimo do aditivo superplastificante no Concreto Ecológico B	92
Figura 31 – Aspecto dos concretos estudados após ensaio de <i>slump test</i>	95
Figura 32 – Comparação entre os resultados de massa específica dos concretos em estado fresco e endurecido	97
Figura 33 – Evolução da resistência à compressão dos concretos estudados.....	98
Figura 34 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados	100
Figura 35 – Evolução da absorção de água por imersão dos concretos estudados.....	102
Figura 36 – Correlação entre absorção de água por imersão e relação a/finos	103
Figura 37 – Índice de vazios obtido por meio do ensaio de absorção de água por imersão...	104
Figura 38 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos estudados.....	105
Figura 39 – Resistividade elétrica dos concretos estudados aos 7, 14, 28 e 63 dias	106
Figura 40 – Correlação entre relação a/finos e resistividade elétrica dos concretos estudados	107
Figura 41 – Correlação entre resistividade elétrica e índice de vazios obtido por ensaio de absorção de água por imersão.....	107
Figura 42 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 7, 14, 28 e 63 dias dos concretos estudados	108
Figura 43 – Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos a partir de ensaio com ultrassom	109
Figura 44 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e volume de pasta dos concretos	110
Figura 45 – Correlação entre resistividade elétrica e módulo de elasticidade dinâmico dos concretos, aos 28 dias	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental e exigências de projeto conforme NBR 12.655 (ABNT, 2015).....	11
Tabela 2 – Valores atribuídos ao índice K	22
Tabela 3 – Composição das misturas (kg/m ³) e resistência característica (f_{ck}), aos 28 dias.....	29
Tabela 4 – Características físicas, químicas e mecânicas do CII-F 32.....	39
Tabela 5 – Diâmetros dos materiais finos	40
Tabela 6 – Resultado da caracterização dos agregados	43
Tabela 7 – Massa unitária e densidade de empacotamento das classes da areia	45
Tabela 8 – Densidade de empacotamento de cada classe de agregados.....	47
Tabela 9 – Proporções de brita 1 e brita 0 para ensaio de empacotamento dos agregados	50
Tabela 10 – Proporções para ensaio de empacotamento dos três agregados.....	51
Tabela 11 – Procedimento de mistura das pastas	52
Tabela 12 – Quantidade de corpos de prova para a campanha experimental.....	54
Tabela 13 – Traço do concreto de referência	56
Tabela 14 – Parâmetros de consistência	60
Tabela 15 - Combinações volumétricas obtidas e densidade de empacotamento dos modelos de otimização.....	69
Tabela 16 – Variações na proporção de agregados e densidade de empacotamento	72
Tabela 17 – Densidade de empacotamento em função da variação das proporções de finos ..	80
Tabela 18 – Obtenção do volume dos materiais do traço de referência	82
Tabela 19 – Resumo das tentativas para otimização dos agregados e previsão da resistência de dosagem.....	84
Tabela 20 - Otimização dos finos que compõem a pasta e resistência à compressão de dosagem estimada.....	85
Tabela 21 – Obtenção do consumo de materiais do Concreto Ecológico A	87
Tabela 22 – Correção da água e novos parâmetros para cálculo da previsão de resistência do Concreto Ecológico A	90
Tabela 23 – Obtenção do consumo de materiais do Concreto Ecológico B.....	91
Tabela 24 – Consumo de materiais e parâmetros dos concretos produzidos	93
Tabela 25 – Propriedades dos concretos no estado fresco.....	94

Tabela 26 – Comparação dos resultados experimentais com a resistência prevista pelo método de Fennis (2011) e Fennis <i>et al.</i> (2013b)	99
Tabela 27 – Comparação entre os valores experimentais de resistência à tração por compressão diametral e os resultados teóricos, calculados com base na resistência à compressão, aos 28 dias	101
Tabela 28 – Custos dos materiais envolvidos na produção dos concretos produzidos	112

NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\%m_A^i$	Porcentagem, em massa, correspondente à proporção do agregado A na etapa i	[%]
m_B^i	Massa a ser adicionada do agregado B na etapa i	[kg]
m_B^{i-1}	Massa do agregado B acrescida na etapa anterior	[kg]
A_c	Absorção de água por capilaridade	[g/cm ²]
A_i	Absorção de água por imersão	[%]
$a_{ij,c}$	Coeficiente referente ao efeito de afastamento considerando o efeito de aglomeração	[-]
a_{ij}	Coeficiente referente ao efeito de afastamento	[-]
$b_{ij,c}$	Coeficiente referente ao efeito parede considerando o efeito de aglomeração	[-]
b_{ij}	Coeficiente referente ao efeito parede	[-]
C_a	Constante de compactação-interação relacionado ao efeito de afastamento $a_{ij,c}$	[-]
C_b	Constante de compactação-interação relacionado ao efeito parede $b_{ij,c}$	[-]
$CPFT$	Porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D	[%]
CSF	Fator de espaçamento do cimento	[-]
D	Diâmetro da partícula	[μm]
d_i	Diâmetro das partículas da classe i	[μm]
d_j	Diâmetro das partículas da classe j	[μm]
D_{max}	Diâmetro da maior partícula do conjunto	[μm]
D_{min}	Diâmetro da menor partícula	[μm]
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico	[kN/mm ²]
E_v	Índice de vazios do concreto	[%]
I	Corrente aplicada	[Ampere]
K	Índice de compactação	[-]
K_a	Contribuição da adição para o índice de compactação K	[-]
K_b	Contribuição do aglomerante para o índice de compactação K	[-]
K_{cem}	Contribuição do cimento para o índice de compactação K	[-]
K_i	Índice de compactação parcial da classe i	[-]
M	Massa da pasta que ocupa o molde	[kg]
M_c	Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água	[g]
M_i	Massa do corpo de prova, imerso em água	[g]

M_s	Massa do corpo de prova seco em estufa	[g]
M_{sat}	Massa do corpo de prova saturado	[g]
m_A	Massa do agregado A	[kg]
m_{ag}	Massa unitária do agregado	[kg/m ³]
m_{mag}	Massa unitária da mistura de agregados	[kg/m ³]
n	Número de classes da mistura	[-]
q	Coefficiente de distribuição	[-]
R_α	Relação volumétrica de α , respeito ao total de materiais cimentícios	[-]
R_β	Relação volumétrica de β , respeito ao total de materiais cimentícios	[-]
R_γ	Relação volumétrica de γ , respeito ao total de materiais cimentícios	[-]
U	Tensão medida	[Volts]
u	Relação de vazios da pasta	[-]
u_{min}	Mínima relação de vazios	[-]
u_w	Relação água/cimento, em volume	[-]
V	Velocidade da onda	[km/s]
V_c	Volume sólido de materiais cimentícios	[m ³]
V_m	Volume do molde utilizado	[m ³]
V_p	Volume parcial de todas as partículas sólidas	[m ³]
V_w	Volume parcial de água	[m ³]
v	Índice de vazios de um conjunto granular	[%]
$w_{0,a}$	Função para o máximo alcance do efeito de afastamento	[-]
$w_{0,b}$	Função para o máximo alcance do efeito parede	[-]
w_a	Constante denotando o máximo alcance do efeito de afastamento	[-]
w_b	Constante denotando o máximo alcance do efeito parede	[-]
y	Volume relativo de cada classe	[-]
y_a	Volume relativo da adição	[-]
y_c	Volume relativo do cimento	[-]
y_i	Volume relativo da classe i	[-]
y_j	Volume relativo da classe j	[-]
α	Distância entre eletrodos	[cm]
β_c	Densidade de empacotamento do cimento	[-]
β_i	Densidade de empacotamento da classe i	[-]
γ	Densidade de empacotamento virtual da mistura	[-]
γ_c	Densidade de empacotamento virtual para a classe de cimento	[-]
γ_i	Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i é	[-]

	dominante	
ν	Coeficiente de Poisson dinâmico	[-]
ρ	Resistividade do concreto	[$\Omega \cdot \text{cm}$]
ρ_{ag}	Massa específica do agregado	[kg/m^3]
ρ_A	Massa específica do agregado A	[kg/m^3]
ρ_B	Massa específica do agregado B	[kg/m^3]
ρ_{conc}	Massa específica do concreto	[kg/m^3]
ρ_w	Massa específica da água	[kg/m^3]
ρ_α	Massa específica do material α	[kg/m^3]
ρ_β	Massa específica do material β	[kg/m^3]
ρ_γ	Massa específica do material γ	[kg/m^3]
φ^*_b	Volume máximo que o aglomerante pode ocupar devido às outras partículas	[-]
φ^*_{cem}	Volume máximo que o cimento pode ocupar devido às outras partículas	[-]
ϕ	Densidade de empacotamento real	[-]
ϕ_b	Volume parcial ocupado pelo aglomerante em uma estrutura de partículas estáveis	[-]
ϕ_{cem}	Volume parcial ocupado pelo cimento em uma estrutura de partículas estáveis	[-]
ϕ_{exp}	Concentração de sólidos	[-]
ϕ_{mix}	Volume relativo de sólidos da mistura real	[-]

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento é um processo oneroso e altamente energético emitindo grandes quantidades de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera. A emissão de CO_2 é decorrente, sobretudo, da decomposição em óxidos dos carbonatos presentes no calcário, matéria prima para a produção de cimento. Esse processo é denominado de calcinação. Outra fonte de emissão de gases na atmosfera é proveniente da combustão de combustível para aquecer os fornos para produção do clínquer (MULLER E HARNISH, 2008, REBMANN, 2011).

Atualmente existem estratégias já consolidadas para reduzir as emissões de CO_2 resultantes da produção do clínquer, tais como a substituição parcial desse material por adições minerais, como as pozolanas, e o aumento da eficiência energética do processo de produção. Embora sejam importantes, somente essas estratégias não são capazes de reduzir o CO_2 emitido pela indústria de cimento de forma satisfatória. Uma opção é através de investimentos no produto final, como o concreto. (MULLER E HARNISH, 2008)

O concreto é um material largamente utilizado na construção civil, não só pelo seu baixo custo, mas também pela facilidade de execução e comportamento satisfatório quando submetido a esforços mecânicos (MEHTA E MONTEIRO, 2008; TUTIKIAN *et al.*, 2011). Entretanto, muitas vezes a dosagem de um concreto com consumos de cimento elevado, acima de 350 kg/m^3 , pode favorecer o desenvolvimento de fissuras por retração térmica e química, além de causar impactos econômicos e ambientais.

Assim, é importante que sejam realizados estudos para consolidar técnicas que envolvam a produção de “concretos ecológicos” por meio de conceitos de empacotamento de partículas e uso de materiais alternativos (DAMINELI *et al.*, 2010).

O termo “concreto ecológico” vem sendo comumente utilizado em pesquisas para caracterizar um concreto com certa característica que o difere do convencional, e que atende tanto requisitos técnicos como de sustentabilidade. De forma geral, confere-se ao conceito de “concreto ecológico” a substituição parcial do cimento, dos finos ou dos agregados por resíduos ou materiais oriundos de rejeitos industriais (VAN DEN HEEDE e DE BELIE, 2012).

Meyer (2009) evidencia que a indústria de cimento é a grande causadora de problemas ambientais, pois envolve o consumo de matéria prima finita e emissão de CO_2 para a atmosfera. Assim, o autor atribui ao termo “concreto ecológico” a necessidade de substituir, o máximo possível, o cimento Portland por materiais cimentícios suplementares, especialmente

os subprodutos oriundos de processos industriais e materiais reciclados no lugar de recursos naturais. No Brasil há uma previsão normativa que permite a substituição de até 70% de clínquer por escória de alto forno (ABNT NBR 5735, 1991), e de até 50% por cinza volante (ABNT NBR 5736, 1991), produzindo cimentos com características e aplicações próprias. Segundo conceitos de sustentabilidade apresentados em parágrafos anteriores, estes cimentos, por si só, apresentam caráter ecológico e o seu uso poderia caracterizar concretos ecológicos.

Van den Heede e De Belie (2012) acrescentam que, para a produção de um concreto ecológico, é importante considerar parâmetros de dosagem para obtenção de concretos trabalháveis, resistentes, duráveis e aplicáveis.

Conforme o exposto, neste trabalho, o conceito de “concreto ecológico” está relacionado a um consumo reduzido de cimento Portland, obtido tanto pela utilização de técnicas de empacotamento de partículas, as quais podem otimizar a composição do concreto, quanto pela utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland.

Nos últimos anos, foram desenvolvidos métodos que permitem melhorar a composição do concreto, dosando-o por meio do empacotamento das partículas (LANGE *et al.*, 1997; REBMANN *et al.*, 2010), o que permite a otimização de misturas granulares e produção de concretos de alto desempenho (FORMAGINI, 2005; PEREIRA e LIBÓRIO, 2009; ELRAHMAN e HILLEMEIER, 2014).

Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013a) aprimoraram modelos de empacotamento existentes para o desenvolvimento de um método de dosagem, o qual considera conceitos de excesso de água, interação das partículas e energia de compactação, visando a otimização da mistura. O modelo é de caráter cíclico que engloba três fases de análises numéricas e interações, sem a necessidade de realização de ensaios no concreto. Para tanto são necessários outros tipos de ensaios: os de caracterização dos agregados e materiais finos, tidos como o cimento e adições. As etapas de dosagem visam obter uma mistura densa, pelo empacotamento da pasta e dos agregados, avaliando a demanda de água necessária para preencher os vazios, proporcionar a fluidez da mistura e predizer a resistência do concreto.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo utilizar o método de dosagem proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), o qual está baseado em técnicas de empacotamento de partículas, para dosar, produzir e avaliar as propriedades de um concreto ecológico. Busca-se comparar as propriedades, no estado fresco e endurecido, deste concreto ecológico com as

propriedades obtidas para um concreto convencional, dosado através do método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992).

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, as considerações quanto às questões ambientais que envolvem o mercado da construção civil são o foco de discussões e estudos em todo o mundo. À medida que as potências econômicas crescem, a demanda por materiais de construção, como o cimento e o concreto, também aumenta (REBMANN, 2011).

No panorama mundial, a produção de cimento alcançou 3.831 milhões de toneladas em 2012, o que corresponde a um consumo de 543 kg/hab.ano, sendo o Brasil classificado como o quinto maior produtor deste material (SNIC, 2013). O aumento da fabricação de clínquer gera alguns problemas de sustentabilidade ambiental, como a redução da longevidade das jazidas de matérias primas e os aumentos do consumo de energia e de emissão de CO₂.

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) destaca que, em 40 anos, as emissões de CO₂ pela produção de cimento e combustíveis fósseis triplicou, e ao evidenciar o cimento, o relatório estima que a cada ano sua produção aumenta, em média, 2,5%.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) enfatiza, em seu parecer, a necessidade de reduzir o consumo de energia para a produção de cimento em 3% até 2025, a fim de reverter o cenário mundial quanto aos efeitos climáticos, uma vez que só a fabricação de cimento corresponde a um consumo de 8,5% do total de energia utilizada pelas indústrias. Uma das ações que o relatório apresenta é a necessidade de investimento em pesquisas, visando a substituição do clínquer e adoção de práticas e técnicas mais sustentáveis.

Conforme o exposto evidencia-se a importância do desenvolvimento de métodos para minimizar os impactos ambientais provocados pelo uso do cimento, e consequentemente o concreto, na construção civil.

Os modelos de empacotamento de partículas podem auxiliar na composição de misturas ótimas para melhorar o esqueleto granular que compõe os concretos, considerando tanto os agregados como os materiais finos. Esta otimização permite reduzir o consumo de cimento Portland gerando benefícios econômicos e ambientais. Por outro lado, ainda são necessários estudos mais aprofundados que demonstrem a utilização desses modelos e a garantia de produção de concretos com boas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Rebmann (2011) e Recena (2011), em seus trabalhos, buscaram produzir concretos com baixo consumo de cimento Portland através dos conceitos de empacotamento de partículas, melhorando a estrutura granular e a composição da pasta. Ou autores destacaram a importância de estudar alternativas e formas de aperfeiçoar os métodos de dosagem, para produção de concretos cada vez mais sustentáveis e duráveis.

Fennis *et al.* (2013b) complementa afirmando a importância de reduzir os impactos ambientais gerados pela construção civil; e com a elaboração do seu método de dosagem, também demonstrou a possibilidade de dosar novos tipos de concreto. Assim, a utilização desse método fornece suporte técnico e científico para dosagem de concretos ecológicos, embasando a presente pesquisa.

Outra forma de reduzir energia e custos envolvidos na produção do concreto, bem como o consumo de cimento Portland, está no uso de um subproduto pozzolânico e/ou cimentício, em substituição parcial do cimento. Tal prática consiste em uma opção interessante do ponto de vista técnico, pela possibilidade de melhora das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, e ambiental pelo reaproveitamento de tais materiais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Vaghetti (2005) comenta o fato de que utilizar adições minerais no concreto, especialmente a cinza volante e a cinza de casca de arroz, as quais apresentam atividade pozzolânica e são rejeitos ou subprodutos poluidores da natureza, contribui para evitar a deposição desses resíduos no meio e ainda promovem a melhora das propriedades do concreto.

Em se tratando da cinza de casca de arroz, 4% de toda a massa de arroz produzida no país podem ser transformadas em cinza de casca de arroz. No Brasil, a estimativa de produção de casca de arroz para o ano de 2015 foi de cerca de 12 milhões de toneladas (IBGE, 2015). A maior parte desse material é despejada como resíduos em campos abertos provocando a contaminação do solo e rios; e apenas uma pequena quantidade é aproveitada como fonte de energia (ANTIOHOS *et al.*, 2014).

Dal Molin (2011) afirma que a cinza de casca de arroz pode ser transformada em sílica de casca de arroz, a qual é utilizada como adição para concretos e argamassas (DAL MOLIN, 2011). O material passa a ser denominado de sílica pelo fato de passar por processo de combustão em leito fluidizado, sistema de automação e controle de temperatura, que permitem a extração da sílica da casca de arroz em seu formato amorfo, diferente da cinza de casca de arroz que não passa por controle de queima rigoroso (SILICA VERDE DO ARROZ LTDA, 2013). Essa adição pode ser utilizada em substituição parcial do cimento, trazendo

vantagens relacionadas à retirada desse subproduto poluidor do meio ambiente, aproveitamento as suas características físicas e químicas para melhorar as propriedades do concreto, e, por fim, resultando na redução da quantidade de cimento nas composições.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo atual, **Capítulo 1**, corresponde a esta introdução em que se apresenta a contextualização e a problemática do tema, os objetivos e as justificativas para a execução desta pesquisa.

O **Capítulo 2** contém uma revisão da literatura sobre a possibilidade de produção de concreto ecológico, com consumo reduzido de cimento. Se discorre ainda sobre modelos de empacotamento de partículas relacionados à composição de misturas otimizadas, e propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto ecológico.

No **Capítulo 3** se apresenta o programa experimental estabelecido para cumprir os objetivo proposto neste trabalho. Dentre os itens abordados estão o estudo para otimização dos agregados e dos materiais finos que compõem o concreto ecológico, seguidos do método de dosagem utilizado para determinar os traços dos concretos avaliados. Por fim, estão descritos nesse capítulo os ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido e ensaios de durabilidade dos concretos produzidos.

Os resultados e discussões pertinentes a este trabalho seguem no **Capítulo 4**, no qual se analisa criticamente os fenômenos e resultados observados durante a realização do procedimento experimental proposto.

Por fim, no **Capítulo 5** se expõem as considerações finais derivadas dos distintos procedimentos realizados, e se propõem diferentes sugestões de pesquisa que permitiriam uma continuidade e aprofundamento dos aspectos abordados na presente pesquisa.

Apresentam-se ainda cinco **Apêndices** que complementam e auxiliam no entendimento dos assuntos abordados nessa dissertação, nos quais se relatou:

- A - Roteiro de cálculo do modelo CPM;
- B - Roteiro de cálculo do modelo CIPM;
- C - Caracterização dos agregados;
- D - Roteiro de cálculo para determinação do traço ecológico;
- E - Caracterização dos concretos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão das principais bibliografias que discutem sobre o consumo reduzido de cimento e alternativas para prever a produção de concreto com caráter ecológico. Métodos de empacotamento de partículas estão diretamente relacionados à produção destes concretos, pois através deles é possível otimizar sua composição. Muitos autores consideram o empacotamento tanto dos agregados como dos componentes da pasta como um fator indispensável na dosagem, assim, o trabalho buscou discorrer também sobre os principais modelos de empacotamento utilizados atualmente.

Além disso, ao dosar um concreto não convencional, seja pela utilização de materiais ou métodos alternativos, é necessário avaliar parâmetros mecânicos e de durabilidade, demonstrando a possibilidade de utilização desse concreto na construção civil. Assim, essa revisão aborda sobre esses princípios e formas de avaliar o comportamento do concreto.

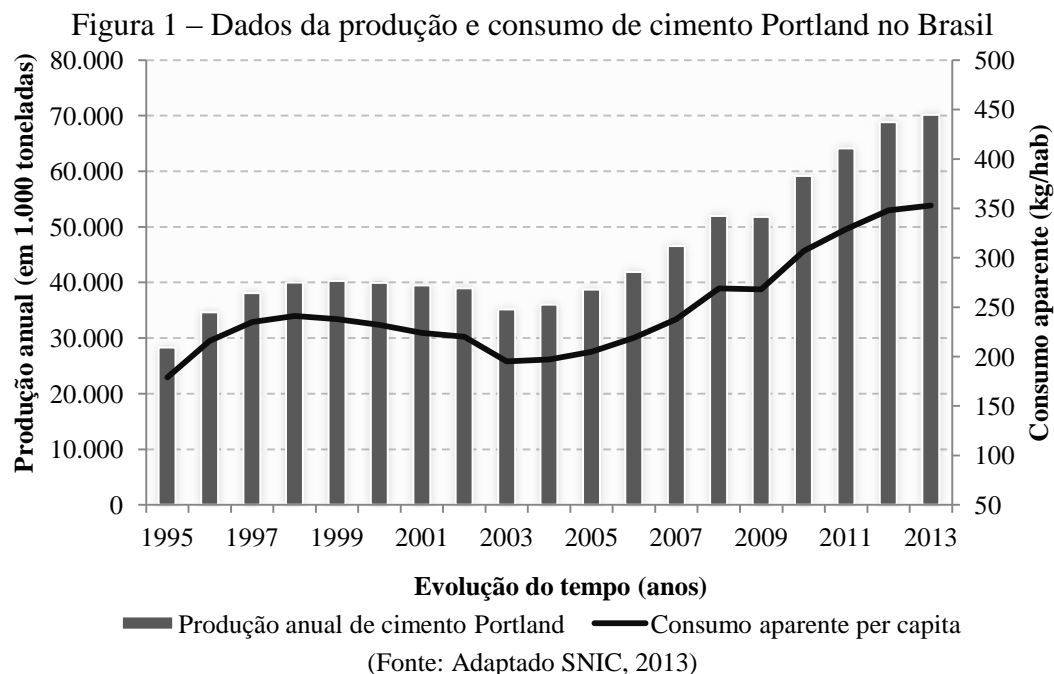
2.1 CONCRETO ECOLÓGICO

No presente trabalho o termo “concreto ecológico” está relacionado a um consumo reduzido de cimento, obtido tanto pela utilização de técnicas de empacotamento de partículas, as quais podem otimizar a composição do concreto, quanto pela utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento. A sua produção envolve inteirar-se das características físicas e químicas dos materiais que o compõe, visando aproveitar ao máximo suas propriedades. O conhecimento dos materiais é extremamente relevante para se obter misturas otimizadas, que respondam às propriedades para as quais foram projetadas, assim como para prever o comportamento do concreto durante seu tempo de utilização.

2.1.1 Cimento Portland

O cimento consiste no material mais utilizado na construção civil, correspondendo, conforme o relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), a um consumo per capita nacional de 353 kg/hab.ano em 2013. Nesse mesmo ano a produção de cimento no Brasil atingiu os 70,2 milhões de toneladas, representando um aumento de 26% em relação à 2008, quando se produziu 52,0 milhões de toneladas.

Na Figura 1 é possível observar a evolução da produção de cimento Portland no Brasil e do consumo *per capita* desse material. Nota-se que a partir do ano de 2007 a produção, a qual estava estagnada durante os anos anteriores, volta a crescer.



Esse crescimento pode ser relacionado diretamente ao aquecimento do mercado da construção civil, até o ano de 2013, o qual é impulsionado pela necessidade de investimentos em infraestrutura e construções em geral, promovendo o desenvolvimento econômico do país.

O cimento Portland comercializado é composto basicamente por silicatos de cálcio, sendo o calcário a principal matéria prima, contribuindo de 85 a 95% na fabricação do clínquer. O clínquer é produzido a partir da queima de uma mistura principal de calcário e argila ou outros materiais com composições similares a uma temperatura de cerca de 1450 °C, e então é misturado com gipsita e moído para produzir o cimento Portland (TAYLOR, 1990). Não obstante, esse processo de produção de cimento gera vários problemas relacionados à sustentabilidade, como a redução das jazidas de matérias primas e o aumento de emissão de CO₂ e de consumo de energia.

Muller e Harnish (2008) ressaltam que a produção de uma tonelada de cimento geralmente resulta em uma emissão de 0,65 a 0,95 toneladas de CO₂, e, em média, 40% dessas emissões resultam do processo de combustão e da energia necessária para a produção do clínquer, sendo o restante das emissões relacionado à calcinação do calcário.

As estimativas são de que, com a melhoria dos processos de produção, e a realização de estudos que reduzam o consumo de clínquer, as emissões de CO₂ diminuam em até 12% em 2025 (IEA, 2015). Cabe salientar que a emissão de CO₂ e o consumo de energia variam de acordo com a eficiência, o tipo de processo de produção, o tipo de energia utilizada e o teor de clínquer utilizado para produzir determinado tipo de cimento.

No Brasil estão disponíveis de seis tipos básicos de cimento Portland normalizados, os quais possuem subtipos e classes permitindo a aplicação em diversos empreendimentos. A diferença entre cada tipo está na proporção de clínquer, sulfato de cálcio e de adições, como escórias, pozolanas e fíler calcário (BATTAGIN, 2011; REBMANN, 2011).

Para os produtores de concreto é interessante reduzir a quantidade de cimento utilizada visando diminuir os gastos da produção. Já sob um ponto de vista mais técnico, a redução do consumo de cimento é capaz de reduzir fenômenos como o calor de hidratação e a retração, os quais podem causar problemas de fissuramento, e são proporcionais ao volume de pasta cimentícia do concreto (KWAN e MORA, 2001).

Em se tratando de estruturas de grande porte, como barragens e blocos de fundação, o calor gerado pelas reações de hidratação do cimento, principalmente no período da pega, em geral com duração de 4 a 8 horas se torna muito relevante, já que promove uma elevação considerável da temperatura interna do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; REBMANN, 2011).

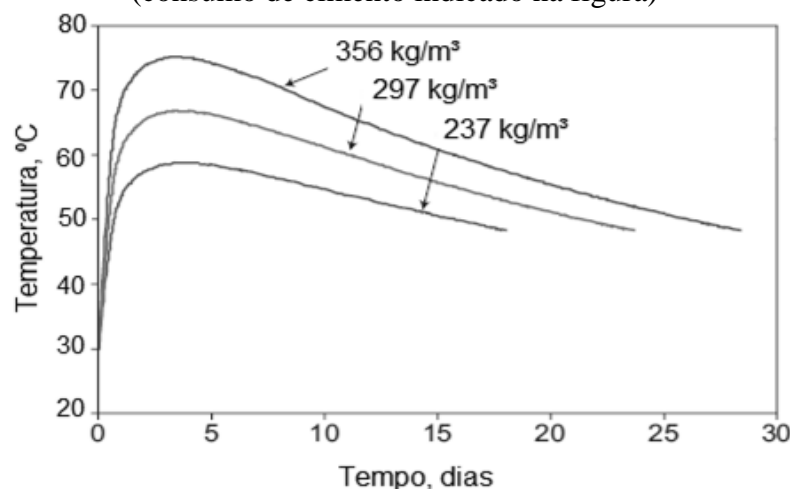
O aquecimento do concreto provoca alterações volumétricas, que devido às características do elemento estrutural ou ao gradiente de temperatura interna em relação à superfície da peça, possibilita o surgimento de tensões internas favorecendo o aparecimento de fissuras. Essas fissuras além de prejudicarem a qualidade do material facilitam o acesso de ar, água e agentes agressivos ao concreto. Além das alterações volumétricas, ao atingir temperaturas próximas ou superiores a 70°C, pode ocorrer a desestabilização da etringita, resultando no desenvolvimento de etringita tardia. Esses produtos se expandem e com o tempo ocasionam fissuras (GAJDA e ALSAMSAM, 2006).

Desse modo, as principais alternativas para reduzir a geração de grande quantidade de calor de hidratação é a redução do consumo de cimento e também o seu tipo. Utilizando, assim, cimentos com baixo calor de hidratação (mais grossos e/ou com menores teores de C₃A e C₃S) ou com substituição do clínquer por adições minerais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Gajda e Alsamsam (2006) analisaram experimentalmente o desenvolvimento da temperatura em concretos com 3,0 m de espessura e diferentes consumos de cimento Portland comum, estimando um aumento de 0,132 °C por kg de cimento por metro cúbico de concreto.

Quanto maior o consumo de cimento, maior a quantidade de calor gerado e maior o tempo para o material retornar à mesma temperatura, como segue na Figura 2.

Figura 2 – Desenvolvimento da temperatura em concretos de cimento Portland comum (consumo de cimento indicado na figura)



(Fonte: adaptado GAJDA e ALSAMSAM, 2006)

Outra vantagem de reduzir o consumo de cimento está em acrescentar adições minerais pozolânicas no concreto, as quais provocarão reações químicas denominadas de reações pozolânicas. Esses materiais reagem com os produtos de hidratação do cimento, facilitada pela dissolução da sílica amorfa proveniente das adições, produzindo sílica na solução dos poros, e reagindo com o hidróxido de cálcio para formar gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Esse tipo de reação resulta em um refinamento dos poros, transformando poros maiores em menores, e melhorando as propriedades mecânicas do concreto (LOHTIA e JOSHI, 1996; CASTRO 2003)

Em um dos estudos que compreende a pesquisa de Elrahman e Hillemeier (2014), foi realizada uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos com adições minerais em substituição parcial do cimento. Os autores observaram que, ao substituir parcialmente o cimento por adições minerais, houve uma redução da porosidade dos concretos, a qual decaiu de 10% – mistura de referência –, para, em média, 3% – demais misturas.

Com o objetivo de avaliar a demanda de água e o uso de aditivo como alternativas para reduzir o volume de pasta, e consequentemente, a quantidade de cimento, Wassermann *et al.* (2009) produziram concretos para diversas estruturas e avaliaram parâmetros de durabilidade. O consumo variou entre 230 a 450 kg/m³, dependendo da relação água/cimento (a/c) que foi de 0,45 a 0,70. Os autores observaram que os fenômenos de absorção e penetração de cloretos dependem da quantidade de cimento, sendo a ocorrência desses fenômenos reduzida nos

concretos com menor consumo. A justificativa dos autores para isso, nesse caso, está no refinamento dos poros obtido pelo uso de superplastificante, o qual permite boa dispersão das partículas do cimento. Assim, com base nos resultados adquiridos, concluíram que a redução no consumo de cimento não produz efeitos negativos na durabilidade do concreto. E, por fim, sugeriram que as recomendações de consumos mínimos citadas por normas sejam revistas.

Por outro lado, Wassermann *et al.* (2009) também verificaram o fenômeno da carbonatação, o qual é independente da quantidade de cimento para uma determinada relação a/c, e não diminui ao reduzir o consumo de cimento. Uma possível explicação, fornecida pelos autores, é que o progresso da frente de carbonatação é influenciado por dois fatores: penetração de CO_2 e reação com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Com a redução do consumo de cimento espera-se reduzir o ingresso de CO_2 , ao considerar uma possível redução da absorção capilar (estrutura de poros mais fina). Porém, a disponibilidade de Ca(OH)_2 será menor, o que poderia acelerar o processo de carbonatação. Por fim, os autores concluem ser importante avaliar os efeitos da redução do consumo de cimento na durabilidade das estruturas, item que será aprofundado posteriormente.

As modificações dimensionais como a retração, por exemplo, também compreendem outro aspecto que pode ser influenciado pela redução do consumo de cimento. Um traço de concreto convencional com menor consumo terá maior tendência de apresentar retração e variações volumétricas, decorrente da sedimentação e exsudação relacionada à falta de finos. No entanto, ao ajustar a granulometria dos agregados e adicionar finos complementares é possível obter uma mistura mais compacta, permitindo reduzir a ocorrência desses fenômenos (REBMANN, 2011).

Recomendações normativas referentes à parâmetros para a dosagem de concretos podem ser obtidas na NBR 12.655 (ABNT, 2015), a qual estabelece critérios relacionados à durabilidade e qualidade de estruturas de concreto. Dependendo do tipo de agressividade a que determinado elemento estará exposto, é designada uma quantidade mínima de consumo de cimento, a qual varia de 260 a 360 kg/m^3 .

Associadamente, a norma brasileira traz recomendações quanto ao cobrimento nominal mínimo de armaduras em concreto armado, relação água/cimento (a/c) máxima e resistência mínima, relacionadas à agressividade do ambiente, conforme Tabela 1. Cabe salientar que os valores existentes na norma NBR 12.655 (ABNT, 2015) não apresentam variações em função do tipo de cimento, uso de adições minerais ou de aditivos químicos.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental e exigências de projeto conforme NBR 12.655 (ABNT, 2015)

Classe	Tipo de ambiente	Relação a/c máxima	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	Cobrimento nominal mínimo ⁽¹⁾ (mm)	Resistência mínima (MPa)
I	Rural	0,65	260	25	20
	Submersa				
II	Urbana	0,60	280	30	25
III	Marinha	0,55	320	40	30
	Industrial				
IV	Industrial ⁽²⁾	0,45	360	50	40
	Respingos de maré				

(1) Referente a pilares e vigas, sendo reduzido em 5 mm para lajes

(2) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas

A norma europeia CEN EN 206-1 apresenta informações gerais quanto ao uso de cimento, deixando a cargo dos países membros a elaboração de limites de consumo (REBMANN, 2011). Na Holanda, a norma NEN-EN 206-1 determina um consumo de cimento variando de 260 a 360 kg/m³, permitindo a adição de filers e a substituição de cimento por cinza volante e sílica ativa (FENNIS, 2011).

A origem dessas especificações por boa parte das normas pode estar relacionada a resquícios da época em que a única forma de controlar a trabalhabilidade, era através da relação água/cimento. Fato que, atualmente, pode ser resolvido através do uso de aditivos plastificantes. Outra questão envolvida é para possibilitar um mínimo de finos visando à coesão da mistura, como forma de evitar a segregação e exsudação. Entretanto, areias muito finas e adições minerais de diversas origens podem ser utilizadas para aumentar a proporção de finos, sem a necessidade de consumir mais cimento (WASSERMANN *et al.*, 2009).

Wassermann *et al.* (2009) acrescentam que questões de durabilidade, se visa aumentar a proteção do aço em concretos armados contra a penetração de cloretos e CO₂, por exemplo, também podem constituir em parâmetros para estabelecer consumos mínimos de cimento. Uma vez que, o ataque de agentes agressivos está fortemente relacionado à estrutura capilar do concreto, controlada por vários fatores incluindo a quantidade de cimento.

2.1.2 Adições minerais

Atualmente o uso de adições minerais para a produção de concreto está cada vez mais comum, seja substituindo parcialmente o clínquer ou o cimento. A maior parte desses materiais são resíduos provenientes de indústrias e que muitas vezes apresentam dificuldades

para uma destinação eficiente. Assim, o reaproveitamento desses materiais não só reduz o impacto ambiental, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas pela indústria da construção civil (DAL MOLIN, 2011).

A utilização de adições minerais no concreto visa melhorar as características técnicas, já que estas modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz. E, ademais, promovem um refinamento do volume dos poros capilares aumentando as condições de durabilidade do concreto, além de diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica (SEIDLER e DAL MOLIN, 2006).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais podem ser pozolânicas, algumas cimentantes, e outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas. Em se tratando de adições pozolânicas, estas podem ser definidas como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que na presença de umidade e em temperaturas ambientes, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades cimentantes.

Vaggetti (1999) destaca que, com a hidratação do cimento Portland, e consumo de hidróxido de cálcio (CH) em reação com a pozolana, há a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que ocupam a zona de transição do concreto e contribuem para o refinamento dos poros. Além desse efeito químico, as pozolanas também são responsáveis pelo efeito fíler, que consiste no preenchimento dos espaços existentes entre as partículas que compõem o concreto, efeito este, atrelado à granulometria das partículas, e que confere aumento da resistência da pasta de cimento reduzindo a microfissuração.

Entre as pozolanas mais comuns estão a sílica ativa, o metacaulim, a cinza volante e a cinza de casca de arroz, sendo a cinza volante muito utilizada para produção dos cimentos Portland pozolânicos (CP-II-Z e CP-IV). A cinza volante difere das demais adições, as quais não são incorporadas ao clínquer na produção de cimentos nacionais, porém são utilizadas para melhorar as propriedades dos concretos (DAL MOLIN, 2011).

Em particular, a cinza de casca de arroz é utilizada pelas indústrias beneficiadoras do grão como fonte de calor para os processos de secagem e parboilização do arroz. No Brasil, a estimativa de produção de casca de arroz para o ano de 2015 foi de cerca de 12 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 3,2% em relação ao ano anterior, sendo a região sul a maior produtora, contribuindo, em média, com 78,7% da produção nacional (IBGE, 2015).

Wada *et al.* (2000) avaliaram a performance da cinza de casca de arroz para a produção de concretos e argamassas analisando questões de durabilidade e propriedades mecânicas. Os autores obtiveram um refinamento dos poros atribuído à alta pozolanicidade do material, o

qual é altamente amorfo e com superfície específica muito elevada, resultando em uma densificação da microestrutura.

Vários outros pesquisadores avaliaram a substituição do cimento por cinza de casca de arroz e obtiveram bons resultados ao produzir concretos e pastas com teores de 10 a 20%, em massa (ISMAIL e WALIUDDIN, 1996; SENSALÉ, 2006; ANTIOHOS *et al.*, 2014).

Reddy e Alvarez (2006) observaram que os concretos produzidos com um teor de 10 a 20% de adição em substituição parcial de cimento, apresentaram características melhores do que os concretos de referência. Além disso, o uso desse material resultou em uma redução dos custos para produção de concreto e diminuição do efeito estufa, pelo caráter ambientalmente sustentável da adição.

Junior *et al.* (2010) também avaliaram a resistência à compressão em protótipos de concreto com cinza de casca de arroz. O cimento foi substituído parcialmente pela adição em teores de 15 e 25%. Foi observado, de maneira geral, que o aumento do teor de 15 para 25% acarretou diminuição de resistência à compressão o que pode representar, segundo os autores, um limite para substituição de cimento por essa adição.

Dal Molin (2011) alerta que a maioria das adições, devido à elevada finura e tendência a se aglomerarem, podem elevar o consumo de água o que não auxilia no refinamento dos poros. Esse problema pode ser resolvido com a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes que permitem o aproveitamento do potencial físico-químico da adição pozolânica.

Outro material que pode ser adicionado no concreto é o pó de quartzo, que apresenta um diâmetro variando de 5 a 25 μm , e consiste em uma sílica com elevado grau de moagem, que quando submetido ao tratamento térmico intensifica as reações químicas pelo consumo de hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento. Cabe ressaltar que, mesmo que o pó de quartzo seja inerte à temperatura ambiente, seu uso é importante para o empacotamento granular através do efeito filer de preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de areia (VANDERLEI, 2004).

2.1.3 Agregados

A escolha adequada dos agregados consiste em uma etapa importante para o estudo da composição de concretos, uma vez que a dimensão e o formato desses materiais interferem

nas características da zona de transição e afetam a resistência do concreto. Liborio¹ (2007) *apud* Rebmann (2011) ressalta que o formato do agregado tem relação com o consumo de água, sendo possível obter maior abatimento, para a mesma quantidade de água, com agregados mais finos, porém com bom índice de forma. Além disso, agregados mais arredondados possuem índice de vazios próximo a 33%, e quanto mais angulosos maior será o espaço entre os grãos.

Os espaços vazios existentes entre os agregados são preenchidos pela pasta de cimento, que, no estado endurecido, irá conectar esses grãos garantindo, assim, a integridade e propriedades mecânicas do concreto. Ao propor a dosagem de um concreto ecológico, o qual visa reduzir o consumo de cimento, uma das técnicas é obter um esqueleto granular compacto.

Kwan e Mora (2001) confirmam que o volume de vazios determina o volume mínimo de pasta de cimento necessária para produzir concreto. Uma mistura mais densa e compacta tende a apresentar menos vazios, logo menos pasta é necessário. É importante ressaltar que ao melhorar a granulometria dos agregados – pelo empacotamento dos grãos, por exemplo –, além do volume de pasta, fatores de trabalhabilidade e quantidade de água necessária no concreto são fortemente influenciados.

Rohden (2011) fortalece os conceitos e a importância do empacotamento dos materiais, ressaltando que é necessário avaliar a massa específica aparente dos agregados e a massa unitária como forma de quantificar a quantidade de vazios. A massa específica aparente considera os poros permeáveis do material, enquanto que a massa unitária inclui os vazios existentes entre as partículas. Ao mesclar diferentes tipos de grãos avaliando esses dois parâmetros é possível buscar proporções que apresentem menor volume de vazios.

Moini *et al.* (2015) concluem que a otimização dos agregados consiste em uma boa opção para melhorar as propriedades mecânicas, diminuir a quantidade de materiais cimentícios, reduzir o custo dos materiais e minimizar os impactos ambientais associados à produção de concreto.

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Uma mistura de concreto pode ser entendida como um acondicionamento seco de partículas de agregados, cujos espaços vazios são preenchidos com pasta de cimento. Dado

¹ LIBÓRIO, J.B.L. *Concreto de alto desempenho: uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis*. Notas de aula, disciplina de pós-graduação SET 5891 – Tecnologia dos Concretos Estruturais. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, p. 42, 2007.

que essa matriz é mais cara e, normalmente, menos forte e durável do que uma rocha natural, a estratégia básica de dosagem é projetar uma mistura granular prevendo uma porosidade mínima dos agregados. Paralelamente, a composição da matriz pode ser fixada levando em conta a resistência e a durabilidade, sendo a relação água/cimento o parâmetro chave desse processo (DE LARRARD, 2011).

A dosagem de um concreto deve visar uma distribuição otimizada das partículas que compõe o material, proporcionando uma mistura com o mínimo de vazios e com alta densidade. Para aumentar a densidade diminuem-se os espaços entre as partículas, preenchendo-os com partículas menores, procurando, assim, estabelecer um empacotamento (VANDERLEI, 2004).

Através do empacotamento de partículas é possível melhorar o esqueleto granular que compõem os concretos, considerando tanto os agregados como os materiais finos componentes. Esta otimização do esqueleto granular permite reduzir o consumo de cimento Portland, minimizando a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos.

Ao se tratar dessa otimização, um conceito particularmente importante é o da densidade de empacotamento de um conjunto granular, a qual pode ser definida como o volume de sólidos presentes em uma unidade de volume total. Ela depende de fatores como a forma dos grãos, a distribuição granulométrica das partículas e também dos métodos de compactação aplicados. Logo, para otimizar a densidade de empacotamento, as partículas devem ser selecionadas a fim de minimizar o volume de vazios para obter uma estrutura granular densa e rígida (DE LARRARD, 1999; KWAN e MORA, 2001; FENNIS, 2011). É importante ressaltar que os modelos de empacotamento utilizam relações e proporções volumétricas de partículas e ocupação de espaço.

Oliveira *et al.* (2000) fazem observações sobre os fatores que influenciam o empacotamento de um conjunto granular:

- Em relação ao formato, quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma mistura, pois se verifica o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies irregulares. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica.

- A distribuição granulométrica das partículas tem relação direta com a quantidade de vazios que irá existir entre os grãos. Assim, é necessária variabilidade de partículas com tamanhos e quantidades adequadas, de modo que os grãos menores preencham, da melhor forma possível, o espaço existente entre os grãos maiores.

– Finalmente, a compactação tem grande influência na maneira que as partículas irão se acomodar, pela aplicação de energias de compactação adequadas, que permitam a redução dos vazios sem que ocorra segregação.

2.2.1 Modelos de empacotamento de partículas

Em resumo, o estudo do empacotamento de partículas está relacionado à correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma a preencher os vazios existentes em determinada composição. Assim, vários estudos têm sido direcionados para desenvolver e avaliar modelos que permitam a otimização dos materiais para produção de concretos cada vez mais resistentes, sustentáveis e duráveis.

Existem diferentes tipos de modelos de empacotamento de partículas. Dentre os existentes, no presente estudo serão explorados alguns modelos que produzem como resultado curvas granulométricas ideais, sendo eles propostos por: Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930), e Funk e Dinger (1980). No decorrer do trabalho, foram utilizados modelos que permitem avaliar a densidade de empacotamento de misturas para a obtenção de composições otimizadas propostos por De Larrard (1999) e Fennis (2011). Todos os modelos citados serão detalhados nos itens que seguem.

Baseados nos modelos de empacotamento de partículas existem métodos de dosagem de concreto que consideram a densidade de empacotamento dos materiais finos. Os concretos de pós reativos (CPR), por exemplo, são produzidos a partir da escolha criteriosa de materiais para otimizar o empacotamento do esqueleto granular. Dessa forma, associando também técnicas de cura aprimoradas, é possível reduzir significativamente a porosidade do concreto e atingir resistências à compressão superiores a 200 MPa (YIGITER *et al.*, 2012).

De Larrard e Sedran (1994) produziram, a partir de modelos matemáticos de otimização do empacotamento de partículas, uma argamassa fluida com baixa relação água/aglomerante e resistência à compressão superior a 200 MPa.

Lange *et al.* (1997) também utilizaram modelos matemáticos de otimização para produção de pastas de cimento, sendo constatado que a porosidade das pastas diminuiu e a microestrutura se tornou mais homogênea e densa, o que resultou em boas propriedades mecânicas e aumento da durabilidade.

2.2.2 Métodos para obtenção de curvas granulométricas ideais

Desde o início do século XX muitos pesquisadores, entre eles Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) e Funk e Dinger (1980), vem estudando o efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas, buscando encontrar uma curva granulométrica ideal para uso em concretos.

Füller e Thompson (1907) propuseram a Equação (1) que resulta em uma distribuição contínua de partículas, prevendo que partículas pequenas preencham os espaços vazios entre as partículas maiores. Os pesquisadores estabeleceram um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,5 para obtenção de uma curva com o mínimo de vazios.

$$CPFT = 100. \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (1)$$

Em que: $CPFT$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (μm); D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); q é o coeficiente de distribuição (-).

Alguns autores tentaram melhorar a curva de Füller e Thompson (1907), como Andreasen e Andersen (1930). Eles propuseram a substituição de um coeficiente q fixo por um coeficiente que pudesse variar, no intervalo de 0,33 e 0,50 estabelecido experimentalmente, conforme condições de ensaio (KUMAR e SANTHANAM², 2003 *apud* FENNIS, 2011).

Posteriormente, simulações computacionais demonstraram que valores de q menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo de uma distribuição de partículas, enquanto que para valores maiores obtém-se sempre uma quantidade significativa de vazios (VANDERLEI, 2004).

Observa-se que a Equação (1) não apresenta um limite mínimo de tamanho de partículas, de modo que se admite partículas infinitamente pequenas, o que não condiz com uma situação real. Assim, outras equações foram desenvolvidas ao longo do tempo para expressar a distribuição granulométrica ideal dos agregados. Esta necessidade foi observada por Funk e Dinger (1980) que, a partir do modelo de Andreasen e Andersen, adicionaram um limite inferior ao conjunto de partículas, como se pode observar através da Equação (2).

²KUMAR, S.V.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *The Indian Concrete Journal*, v. 77, p. 1324-1331. 2003.

$$CPFT = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (2)$$

Em que: $CPFT$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (μm); D_{min} é o diâmetro da menor partícula (μm); D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); q é o coeficiente de distribuição (-).

Ressalta-se que estes modelos são baseados no fato de que ao utilizar uma grande amplitude de grãos, a curva irá apresentar uma alta densidade de empacotamento, entretanto não há considerações quanto ao formato das partículas.

Oliveira *et al.* (2000) compararam a densidade de empacotamento obtida experimentalmente a partir dos modelos citados e constataram que a maior densidade de empacotamento foi alcançada pelo modelo de Funk e Dinger (1980), seguido pelo modelo de Andreasen e Andersen (1930).

2.2.3 Modelo CPM

De Larrard (1999) propôs o modelo de empacotamento compressível, CPM (do inglês *Compressible Packing Model*), de caráter analítico e que permite prever a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos, ou seja, constituídos por grãos de diversos tamanhos, chamados de classes. Para a aplicação do modelo é necessário conhecer a distribuição granulométrica do conjunto e a densidade de empacotamento de cada uma das classes componentes, individualmente.

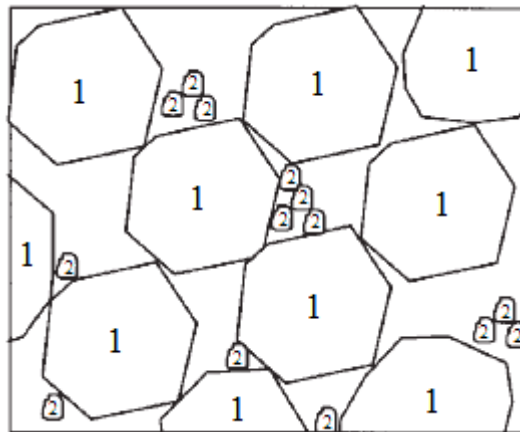
Um conceito muito importante estabelecido pelo modelo é a densidade de empacotamento virtual (γ) de um determinado conjunto granular, a qual consiste na máxima densidade de empacotamento de uma mistura, em que as partículas são dispostas uma a uma no espaço, mantendo o seu formato original. Dessa forma, ao se pensar na densidade de empacotamento virtual de uma mistura com grãos uniformes, esféricos e do mesmo tamanho, dispostos em uma rede cúbica de esferas que se tocam, a densidade de empacotamento virtual é de 0,74, sendo esta a máxima que se pode obter para grãos deste tipo (DE LARRARD, 1999).

Por outro lado, a densidade de empacotamento real apresenta valores diferentes do virtual, já que em uma mistura, as partículas não são colocadas uma a uma no espaço. Além disso, elas estão submetidas a diferentes tipos de compactação, e a interação entre partículas

depende de vários fatores como forma, tamanho dos grãos e tamanho do recipiente que ocupam.

Ao considerar uma mistura de partículas de qualquer formato e dividi-las em n classes de grãos de mesmo tamanho é possível definir uma classe dominante, a qual irá assegurar a continuidade sólida do corpo granular. Por exemplo, em uma mistura binária, demonstrada na Figura 3, a continuidade sólida é garantida pelos grãos da classe 1, nesse caso, de maior dimensão. Os grãos da classe 2, de menor dimensão, apenas ocupam parte dos vazios produzidos pelo empacotamento dos grãos da classe 1.

Figura 3 – Continuidade sólida de um corpo granular

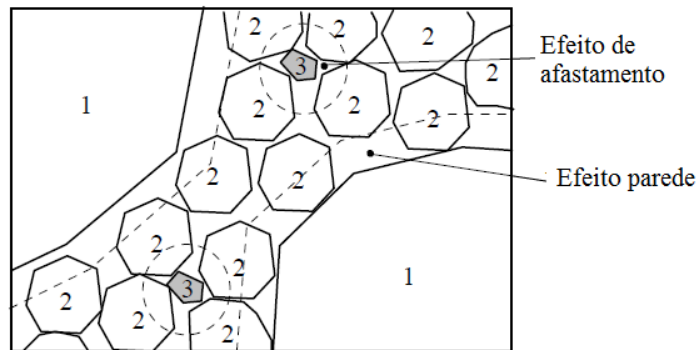


(Fonte: Adaptado DE LARRARD, 1999)

Um fator importante, que é considerado pelo modelo CPM, é o efeito de interação dos grãos. Um dos efeitos é denominado de efeito parede e provoca a diminuição do empacotamento, aumentando a porosidade na proximidade das superfícies grandes, como os agregados maiores e paredes de formas. De uma forma geral, o efeito parede é o efeito exercido pelos grãos maiores sobre os grãos menores. Oliveira *et al.* (2000) descrevem que o efeito parede deixa de ser considerável caso a razão entre os diâmetros dos grãos seja superior a 10.

Quando as partículas mais finas são grandes demais para se encaixarem nos vazios entre as partículas maiores, ocorre um afastamento dos grãos maiores, também provocando o aumento da porosidade e diminuição do empacotamento. Esse efeito de interação dos grãos menores sobre os maiores é denominado de efeito de afastamento. A Figura 4 ilustra os efeitos de interação explicados anteriormente.

Figura 4 – Efeitos de interação das partículas



(Fonte: Adaptado DE LARRARD, 1999)

Na Figura 4 observa-se o efeito parede provocado pela classe 1, de grãos maiores, sobre a classe 2. Em partículas mais finas denota-se o efeito de afastamento provocado pela classe 3 sobre a classe 2.

Para a aplicação do modelo CPM é necessária a ordenação, identificação e caracterização de todas as classes de grãos envolvidas na mistura, considerando cada classe (i) como dominante em cada etapa de cálculo. Cada classe de partículas deve ser ordenada quanto ao tamanho dos grãos, sendo necessário conhecer o valor da densidade de empacotamento (β_i) de cada classe, cuja forma mais adequada é a determinação experimental. Para agregados, a densidade de empacotamento se determina comumente através do índice de vazios, conforme Equação (3).

$$\beta_i = 1 - v = 1 - \left(\frac{\rho_{ag} - m_{ag}}{\rho_{ag}} \right) \quad (3)$$

Em que: β_i é a densidade de empacotamento da classe i (-); v é o índice de vazios (-); ρ_{ag} é a massa específica do agregado (kg/m^3); m_{ag} é a massa unitária do agregado (kg/m^3).

Para materiais finos, existem diversos métodos experimentais os quais determinam a quantidade mínima de água necessária para preencher os vazios entre as partículas finas, obtendo assim, a densidade de empacotamento do material como será explicado posteriormente. Em seguida, determina-se o volume relativo (y) das classes de partículas, sendo obtido pela normalização das porcentagens de cada classe. A soma dos volumes complementares deve ser igual a 1.

Feito isso, se calcula os coeficientes a_{ij} e b_{ij} , os quais representam o efeito de afastamento e o efeito parede, respectivamente. Estes são determinados através das Equações (4) e (5). O cálculo destes coeficientes compara sempre duas classes de tamanhos de grãos,

devendo ser realizadas todas as combinações possíveis entre as n classes que compõem o conjunto. A classe dominante é chamada de classe i , sendo d_i o diâmetro de suas partículas. Em um conjunto granular composto por quatro classes, supondo a classe $n=1$ dominante, esta será chamada de classe i , sendo $i=1$. Todas as demais classes ($n=2$, $n=3$ e $n=4$) serão chamadas de classe j , sendo $j=2$, $j=3$ e $j=4$. Desse modo, as combinações possíveis entre as quatro classes irão resultar no cálculo dos coeficientes a_{12} , a_{13} e a_{14} para determinar o efeito de afastamento e b_{12} , b_{13} e b_{14} para determinar o efeito parede. Em uma segunda etapa de cálculo, há que se considerar a classe $n=2$ dominante (i), sendo as demais ($n=1$, $n=3$ e $n=4$) tidas como complementares (j), calculando novamente os coeficientes a_{ij} e b_{ij} , e assim por diante, até que todas as classes de grãos sejam consideradas como dominantes. Mais informações acerca do cálculo desses coeficientes estão apresentadas no Apêndice A.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (4)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50} \quad (5)$$

Em que: d_i é o diâmetro das partículas da classe i (μm); d_j é o diâmetro das partículas da classe j (μm).

Dessa forma, em se tratando de misturas polidispersas, compostas por n classes de grãos, em que a classe i é dominante, a densidade de empacotamento virtual de cada uma (γ_i) é calculada segundo a Equação (6). A densidade de empacotamento virtual do conjunto (γ) é tida como o menor resultado de γ_i , como segue na Equação (7).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \cdot \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \quad (6)$$

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma_i) \quad (1 \leq i \leq n) \quad (7)$$

Em que: γ_i é a densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i é dominante (-); γ é a densidade de empacotamento virtual da mistura (-); y_j é o volume relativo da classe j (-); β_i é a densidade de empacotamento da classe i (-); a_{ij} , b_{ij} são os coeficientes referentes ao efeito de afastamento e ao efeito parede, respectivamente (-).

Um fator muito importante a ser considerado em misturas reais é a energia de compactação aplicada ao conjunto granular, o que influencia diretamente na disposição dos grãos, alterando o empacotamento. Assim, a densidade de empacotamento real (ϕ) de uma mistura pode ser definida como o volume de sólidos em um volume unitário, e está relacionada à densidade de empacotamento virtual (γ) através de um índice K , que caracteriza o procedimento experimental da compactação utilizado. Na Tabela 2 estão descritos os valores do índice K correspondentes aos processos de compactação executados, conforme De Larrard (1999).

Tabela 2 – Valores atribuídos ao índice K

Processo de compactação	Valor de K
Lançamento simples	4,1
Apiloamento	4,5
Vibração	4,75
Demanda de água	6,7
Vibração e compressão de 10 kPa	9
Proctor teste*	12
Empacotamento virtual	∞

*Valor proposto por Fennis (2011) para uma adaptação do método de Wong e Kwan (2008)
(Fonte: adaptado DE LARRARD, 1999)

Desse modo, De Larrard (1999) propôs uma forma de determinar indiretamente a densidade de empacotamento real, a qual pode ser utilizada como um parâmetro de análise do conjunto granular, calculada através da Equação (8). Quanto maior a densidade de empacotamento, menor a quantidade de vazios e consequentemente mais densa é a mistura.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i/\beta_i}{1/\phi - 1/\gamma_i} \quad (8)$$

Em que: K é o índice de compactação (-); n é o número de classes da mistura (-); β_i é a densidade de empacotamento da classe i (-); γ_i é a densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i é dominante (-); γ_i é o volume relativo da classe i (-); ϕ densidade de empacotamento real (-).

Nota-se pela Equação (8) que a sua complexidade aumenta conforme a quantidade de classes se eleva, pelo fato da variável a ser determinada (ϕ) encontrar-se no denominador, gerando equações de n graus. Assim, é interessante a utilização de software matemático como

o *Maple*³, ou algoritmo computacional, para auxílio na resolução da equação.

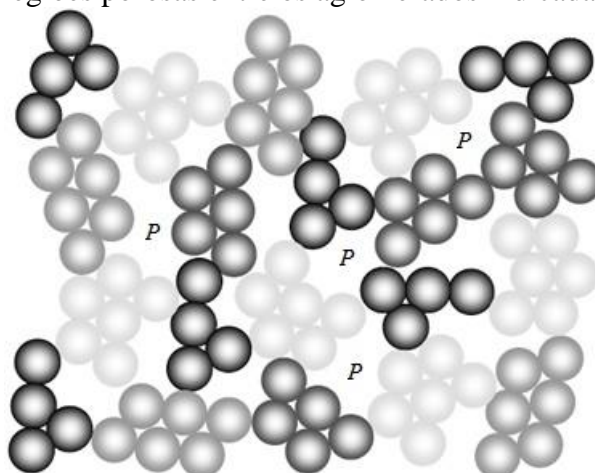
No Apêndice A apresentam-se informações quanto à aplicação do modelo CPM e roteiro de cálculo, para uma mistura com quatro classes de agregados miúdos, otimizados conforme curva de Funk e Dinger (1980).

2.2.4 Modelo CIPM

Fennis (2011) se baseou nos modelos de empacotamento de Schwanda⁴ (1966) e De Larrard (1999) para desenvolver um modelo que considere a interação entre as partículas e a compactação aplicada à mistura, denominado de CIPM (do inglês *Compaction-Interaction Packing Model*).

A principal diferença entre o modelo CIPM de Fennis (2011) e o CPM de De Larrard (1999) é que o primeiro passa a considerar a aglomeração como efeito de interação entre partículas. Fennis *et al.* (2013a) explicam que a aglomeração é causada pelas forças coesivas entre as partículas, tais como a força de atração de Van der Waals, cargas eletrostáticas e ligações químicas.

Figura 5 – Regiões porosas entre os aglomerados indicadas pela letra *P*



(Fonte: Adaptado FENNIS *et al.* 2013a)

Em partículas pequenas essas forças podem ser maiores do que aquelas relacionadas à gravidade e ao cisalhamento, por exemplo, que quebram os aglomerados, fazendo com que as

³<http://www.maplesoft.com/products/Maple/>

⁴SCHWANDA, F. Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für Spannbetonbau. *Zement und Beton*, Vol. 37, pp. 8-17. 1966.

partículas se agrupem. A aglomeração depende do tamanho, distribuição, formato e a rugosidade superficial das partículas, e dificulta os processos de mistura e compactação, e, além disso, há a formação de espaços porosos entre os aglomerados (Figura 5), o que reduz a densidade de empacotamento.

Para a aplicação do modelo CIPM é conveniente iniciar comparando os diâmetros das partículas com o tamanho de 25 μm , adotado por Fennis (2011) como um diâmetro limítrofe para a ocorrência de interações entre partículas e exposto na Equação (10).

Desse modo, Fennis (2011) acrescentou o efeito das interações devido às forças de atração nas equações já propostas por De Larrard (1999). Para isso, a autora analisa o tamanho das partículas e como isso tem influência sobre o comportamento das misturas. A razão entre os diâmetros das classes em uma mistura influencia os efeitos de interação e, consequentemente, a densidade de empacotamento resultante. A razão entre os diâmetros é definida pelo diâmetro da menor classe, dividido pelo diâmetro da maior, resultando sempre em um valor entre 0 e 1. Quando a razão é próxima a zero, a interação entre as classes também é mínima, e a densidade de empacotamento tende a ser a máxima.

Conforme o exposto, para o cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ_i) das n classes de uma mistura pelo modelo CIPM, as Equações (9) a (11) são utilizadas. Os valores de $w_a = w_b = 1$, $C_a = 1,5$ e $C_b = 0,2$ são fixos para misturas produzidas com o superplastificante Glenium 51 e foram estabelecidos através de experimentos. Cabe salientar que esses valores também podem ser utilizados para outros aditivos superplastificantes similares. Porém, caso se altere o tipo de aditivo, o modelo CIPM ainda pode ser aplicado sendo necessário ajustar esses parâmetros de entrada através de procedimento experimental proposto por Fennis (2011) em sua tese.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \cdot \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \quad (9)$$

$$a_{ij,c} = \begin{cases} 1 - \frac{\log(d_i/d_j)}{w_{0,a}} & \log(d_i/d_j) < w_{0,a} \\ 0 & \log(d_i/d_j) \geq w_{0,a} \end{cases} \quad w_{0,a} = \begin{cases} w_a \cdot C_a & d_j < 25\mu\text{m} \\ w_a & d_j \geq 25\mu\text{m} \end{cases} \quad (10)$$

$$b_{ij,c} = \begin{cases} 1 - \frac{\log(d_j/d_i)}{w_{0,b}} & \log(d_j/d_i) < w_{0,b} \\ 0 & \log(d_j/d_i) \geq w_{0,b} \end{cases} \quad w_{0,b} = \begin{cases} w_b \cdot C_b & d_i < 25\mu\text{m} \\ w_b & d_i \geq 25\mu\text{m} \end{cases} \quad (11)$$

Em que: $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$ são coeficientes referentes ao efeito de afastamento e ao efeito parede, respectivamente, considerando o efeito de aglomeração (-); β_i é a densidade de empacotamento da classe i (-); γ_i é a densidade de empacotamento virtual da mistura, quando a classe i é dominante (-); C_a é constante de compactação-interação relacionado ao efeito de afastamento $a_{ij,c}$ (-); C_b é constante de compactação-interação relacionado ao efeito parede $b_{ij,c}$ (-); w_a é constante denotando o máximo alcance do efeito de afastamento (-); w_b é constante denotando o máximo alcance do efeito parede (-); $w_{0,a}$ é a função para o máximo alcance do efeito de afastamento (-); $w_{0,b}$ é a função para o máximo alcance do efeito parede (-); y_j é o volume relativo da classe j (-).

O cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ) e real (ϕ) do conjunto ocorre da mesma forma que para o modelo CPM de De Larrard (1999), conforme Equações (7) e (8) previamente apresentadas. A diferença no cálculo entre os dois modelos está somente nos coeficientes referentes ao efeito de afastamento e ao efeito parede, os quais passam a considerar o efeito da aglomeração que pode ocorrer em classes de partículas com tamanhos inferiores a 25 μm .

Para mais informações quanto à aplicação do modelo CIPM verificar roteiro de cálculo descrito no Apêndice B, para uma mistura com quatro classes, sendo três agregados e um tipo de cimento, otimizados conforme curva de Funk e Dinger (1980).

Conforme o exposto, o novo modelo proposto por Fennis (2011) permite mais confiabilidade nos cálculos, pois ao utilizar o CIPM e comparar com valores experimentais, a pesquisadora obteve uma diminuição do erro médio nos cálculos da densidade de empacotamento de 2,2% para 0,6%, e o erro máximo diminuiu de 6,4% para 1,8%.

2.2.5 Método para otimização dos materiais que compõem pasta

Ao se tratar do empacotamento de materiais finos, os quais compõem a pasta de cimento ou matriz dos concretos, além das características (forma e granulometria) dos grãos e do método de processamento do empacotamento, a aglomeração que as partículas sofrem também deve ser considerada. Entre os aglomerados formados pelas partículas finas, ocorre a criação de regiões porosas que provocam o afastamento dos grãos, aumentando os vazios e diminuindo a densidade de empacotamento. Isto ocorre, pois os materiais finos estão sujeitos às forças de atração de van der Waals, conforme explicado anteriormente no item 2.2.4. A

forma mais usual e efetiva de promover a dispersão das partículas finas é através do uso de aditivos dispersantes (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Desse modo, como a água e os aditivos têm uma grande influência na interação das partículas finas, é importante que a densidade de empacotamento destas partículas seja mensurada sob as mesmas condições de produção e aplicação dos concretos, ou seja, na condição úmida (WONG e KWAN, 2008; FENNIS, 2011).

Wong e Kwan (2008) desenvolveram um método de ensaio experimental onde é possível obter a relação de vazios e a concentração de sólidos em misturas de partículas finas. Ele se baseia na medição da densidade aparente da pasta em seu estado fresco. Para isso são produzidas várias pastas, cada uma com uma relação água/sólidos (a/s) diferente. O ensaio de densidade aparente é realizado para cada pasta produzida, em que se mensura a massa de pasta suficiente para encher um molde cilíndrico de volume conhecido. Assim, a concentração de sólidos pode ser calculada pelas Equações (12) e (13). Bem como é possível obter a relação de vazios (u) da pasta pela Equação (14).

$$V_c = \frac{M}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_\gamma R_\gamma} \quad (12)$$

$$\phi_{exp} = \frac{V_c}{V_m} \quad (13)$$

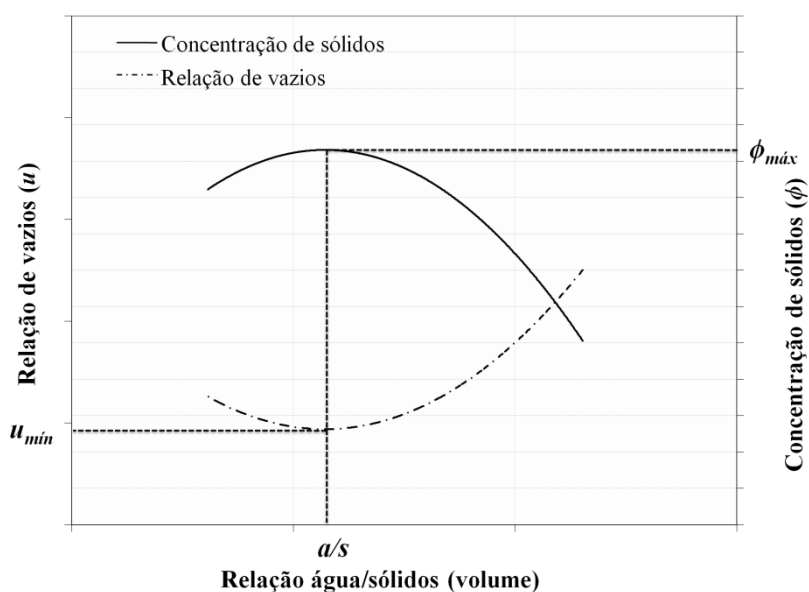
$$u = \frac{V_m - V_c}{V_c} \quad (14)$$

Em que: V_c é volume sólido de materiais cimentícios (m^3); M é a massa da pasta que ocupa o molde utilizado no ensaio (kg); ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3); u_w é a relação água/cimento, em volume (-); ρ_α é a massa específica do material α (kg/m^3); R_α é a relação volumétrica de α , em relação ao total de materiais cimentícios (-); ρ_β é a massa específica do material β (kg/m^3); R_β é a relação volumétrica de β , em relação ao total de materiais cimentícios (-); ρ_γ é a massa específica do material γ (kg/m^3); R_γ é a relação volumétrica de γ , em relação ao total de materiais cimentícios (-); ϕ_{exp} é a concentração de sólidos (densidade de empacotamento experimental); V_m é o volume do molde utilizado no ensaio (m^3).

Com a realização dos cálculos é possível correlacionar a relação água/sólidos (u_w) com a relação de vazios e concentração de sólidos, desenvolvendo um gráfico similar ao apresentado na Figura 6, na qual se observa que há um valor de relação a/s em que a relação

de vazios é mínima (u_{\min}) e a concentração de sólidos é máxima. Esta é a relação a/s mínima necessária para a formação de uma pasta homogênea e este ponto corresponde à densidade de empacotamento do material.

Figura 6 – Comportamento de relação de vazios (u) e concentração de sólidos (ϕ) devido à variação da relação a/s



Quando é acrescido mais água para a produção das pastas, a relação de vazios tende a aumentar, fazendo com que as partículas do material estejam envoltas por água, permitindo o afastamento dos grãos e consequentemente diminuindo a densidade de empacotamento. Quanto maior a relação a/s, maior será o volume de água envolvendo as partículas, de modo que estas se distanciam e a concentração de sólidos diminui. Se a relação a/s for menor que a ideal encontrada, não há água na mistura para envolver completamente as partículas. Logo, há a formação de pontes de ligação nos pontos de contato entre grãos. Assim, por efeito de tensão superficial da água, estas pontes de ligação afastam os grãos uns dos outros. Ao se afastarem, os grãos estão presentes em menor quantidade, diminuindo a concentração de sólidos (WONG e KWAN, 2008).

Li e Kwan (2014) afirmam que o método úmido é eficiente para verificar a densidade de empacotamento de argamassas e concretos por representar condições mais realísticas devido à esses materiais serem aplicados na presença de água. Além disso, o método de Wong e Kwan (2008) permite incorporar o efeito do aditivo superplastificante, simular os efeitos da compactação e avaliar a eficiência do procedimento de mistura.

Conforme o exposto, verifica-se que o método de Wong e Kwan (2008) avalia a demanda de água necessária para uma menor quantidade de vazios que corresponde à uma máxima concentração de sólidos, tida como a densidade de empacotamento do material. Permitindo, assim, otimizar as misturas com partículas finas a partir de suas características e proporções.

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO ECOLOGICO

Ao dosar diferentes composições de concreto faz-se necessário realizar estudos para demonstrar que esse novo material irá cumprir com os requisitos exigidos, em cada situação de aplicação, sejam eles relacionados às propriedades mecânicas e/ou durabilidade. No caso do concreto ecológico, com consumo de cimento reduzido, é importante avaliar esses fatores uma vez que haverá menos cimento na mistura, o que poderia provocar um comprometimento desses requisitos. Assim, os itens que seguem apresentam trabalhos que analisaram as propriedades mecânicas de concretos ecológicos, bem como considerações quanto a questões de durabilidade que envolvem as estruturas de concreto.

2.3.1 Propriedades mecânicas

Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de concretos de caráter ecológico vêm demonstrando a possibilidade de dosar materiais resistentes e duráveis, com consumos de cimento inferiores a 260 kg/m³ (Tabela 1, página 11). A maioria desses projetos se baseia em técnicas de empacotamento de partículas, buscando alcançar densidades de empacotamento elevadas para minimizar a quantidade de vazios nas misturas.

Concretos produzidos na Dinamarca (GLAVIND e MUNCH-PETERSEN⁵, 2002 *apud* FENNIS, 2011) alcançaram resistências à compressão, aos 28 dias, de 26,0 MPa com apenas 90 kg/m³ de cimento Portland, o qual foi substituído por cinza volante e sílica ativa em teores de 55% e 6%, respectivamente.

Fennis (2011) utilizou o empacotamento de partículas finas para desenvolver um método de dosagem para concretos ecológicos, com consumo de cimento abaixo de 200 kg/m³, sem alterar negativamente as propriedades do concreto. A pesquisadora obteve misturas otimizadas, as quais resultaram na redução de 57% do cimento através do

⁵GLAVIND, M.; MUNCH-PETERSEN, C. Green Concrete - a life cycle approach. Challenges of Concrete Construction. University of Dundee. 2002.

empacotamento das partículas e pela introdução de pó de quartzo e cinza volante no concreto em teores de 34 e 24%, respectivamente, ultrapassando 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Na Escócia, Dhir *et al.* (2005) estudaram a redução do consumo de cimento utilizando técnicas de empacotamento de partículas para diminuir a quantidade de vazios no concreto. O consumo de cimento foi minimizado pela utilização de filers e adições oriundas de subprodutos industriais, e pela utilização de aditivos para reduzir a quantidade de água. Os pesquisadores verificaram que ao otimizar o empacotamento das partículas, e incluir filers e superplastificantes para manter o teor de finos e a trabalhabilidade, foi possível produzir concretos com menos cimento, mantendo resultados similares de resistência à compressão, tração, flexão e módulo de elasticidade, em comparação com concretos de referência. Ao substituir 50 kg/m³ de cimento por um filer, com a mesma relação a/c, reduziu-se a quantidade de água em 20 l/m³ e foi possível manter a mesma resistência à compressão de 60 MPa, como é possível observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição das misturas (kg/m³) e resistência característica (f_{ck}), aos 28 dias

Mistura	Cimento Portland	Filer calcário	Agregados			Água	Relação a/c	F_{ck} (MPa)
			Areia	5-10 mm	10-20 mm			
A4R	400	-	670	395	795	160	0,40	59,0
A3M	350	50	545	455	905	140	0,40	61,5

(Fonte: Adaptado DHIR *et al.*, 2005)

No Brasil, pesquisas relacionadas à produção de concretos cada vez mais sustentáveis e com boas propriedades mecânicas também vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos. Recena (2011) estabeleceu uma metodologia própria de dosagem de concreto, avaliando o volume de pasta, com emprego de cinza volante, visando à redução do consumo de cimento e a utilização de um resíduo poluente.

Rebmann (2011) também estudou a execução de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland avaliando algumas propriedades mecânicas e de durabilidade. Através de conceitos de empacotamento e dispersão de partículas o autor obteve concretos com consumo relativo de materiais aglomerantes inferior a 5 kg/m³ para produzir 1 MPa de resistência à compressão, o que para um concreto de 30 MPa corresponderia a um consumo relativo de 150 kg/m³ de aglomerantes. Além disso, os resultados indicaram que os concretos com pouco cimento podem ter durabilidade comparável ou até superior a concretos usuais.

2.3.2 Durabilidade

Está cada vez mais crescente entre os profissionais da área da construção civil o estudo para garantir maior durabilidade das estruturas de concreto, devido aos custos elevados de reparos e manutenção de estruturas existentes. Mehta e Monteiro (2008) estimam que, nos países desenvolvidos, esses custos alcancem a margem de 40% de todos os investimentos da indústria da construção civil. Assim, a busca pelo incremento da durabilidade passa a ser um quesito essencial no planejamento de estruturas a longo prazo.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a durabilidade do concreto pode ser definida como a capacidade de uma determinada estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas na fase de projeto.

O ACI Commitee 201 também atribui à durabilidade do concreto de cimento Portland a propensão de resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Por conseguinte, um concreto durável irá preservar sua forma, qualidade e utilização original quando exposto ao ambiente para o qual foi projetado, sendo necessário também estabelecer métodos para monitorar o comportamento das estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Assim, a verificação de parâmetros de durabilidade consiste em uma forma de avaliar o concreto, principalmente quando há alterações significativas na sua composição, como, por exemplo, a redução de cimento Portland. Nesse âmbito podem-se citar como relevantes a verificação dos fenômenos de carbonatação, de ação de íons cloreto e a realização de ensaios não destrutivos que se correlacionem com a durabilidade do concreto.

A carbonatação é o fenômeno relacionado à penetração da água juntamente com o CO_2 presente na atmosfera nos poros do concreto, reagindo com os compostos hidratados do cimento e alterando a estrutura porosa da pasta cimentícia. Com isso, o efeito da carbonatação reduz a alcalinidade da solução dos poros, provocando a redução do pH do concreto, e a consequente despassivação da armadura em estruturas de concreto armado (ROZIÈRE *et al.*, 2008).

A incorporação de adições minerais ao concreto, como forma de reduzir a quantidade de cimento, induz ao consumo de hidróxido de cálcio (dentre os hidróxidos presentes na pasta de cimento hidratada, o hidróxido de cálcio é o que se encontra em maior quantidade), reduzindo o teor de álcalis na água dos poros e colaborando para que o fenômeno da carbonatação se desenvolva mais rapidamente (VAGHETTI, 2005).

O avanço da carbonatação em estruturas de concreto pode ser avaliado através da aspersão de um indicador de pH em uma superfície fraturada. Caso a superfície da amostra esteja carbonatada, esta não apresentará cor após aspersão, e para a porção não carbonatada, com pH alcalino, demonstrará a presença de cor, que depende do tipo de indicador (fenolftaleína ou timolftaleína). Em ambiente laboratorial, é possível submeter o concreto à ação do CO_2 em ensaio acelerado, em que se controla as condições de umidade relativa, temperatura e concentração de CO_2 , possibilitando correlacionar o ensaio com condições naturais de ocorrência do fenômeno (KULAKOWSKI, 2002).

Junior *et al.* (2010), analisaram a resistência à compressão e a ocorrência de carbonatação natural de concretos com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz, em teores de 15 e 25%. Os concretos foram expostos em condições ambientais naturais (0,3 – 0,4% de dióxido de carbono) durante 30 meses para a avaliação da carbonatação. Os autores constataram que para o traço de referência as profundidades de carbonatação foram menores. Essa condição baseia-se na maior quantidade de hidróxido de cálcio oriundo das reações de hidratação do cimento que não foi consumida pelas reações pozolânicas, que, por ventura, a adição de cinza de casca de arroz consumiria caso estivesse presente na mistura.

Em contrapartida, as adições minerais modificam a microestrutura do concreto ao reduzir o volume dos poros capilares, refinando-os. Além dessa redução da morfologia dos poros, há uma diminuição dos mecanismos de transporte, restringindo os movimentos de água, íons e gases para o interior do concreto, aumentando as condições de durabilidade (SEIDLER E DAL MOLIN, 2006).

Papadakis (2000) verificou tanto o efeito da carbonatação, como a indução de corrosão por penetração de cloretos em concretos com substituição de cimento por adições minerais. O uso da adição mineral prolongou significativamente a iniciação da corrosão causada por cloretos, entretanto resultou em uma taxa de carbonatação maior. Isso devido ao fato de que não somente o hidróxido de cálcio é carbonatado, mas também o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o qual consiste no principal produto da reação pozolânica. Ao reduzir a quantidade de cimento os constituintes carbonatáveis decrescem pela diminuição da quantidade de CaO , resultando em taxas de carbonatação superiores.

No caso da ação de íons cloretos, seu estudo também está relacionado à corrosão da armadura em concretos armados, uma vez que a penetração de íons cloreto acelera o processo corrosivo pela destruição da camada passivadora da armadura. A origem desse agente agressivo pode estar relacionada a produtos de limpeza que entram em contato com o

concreto, a água do mar e a névoa relacionada ao ambiente marinho, uso de água de amassamento contaminada, entre outros (FIGUEIREDO, 2005).

Uma forma de avaliar a profundidade de penetração de cloretos em estruturas de concreto é através da aspersão de nitrato de prata, sendo possível visualizar a formação de duas zonas, uma de cor marrom que representa a ausência de cloretos, e outra esbranquiçada que indica presença de íons cloreto livre. Em laboratório é possível avaliar a ação de íons cloreto no concreto através de ensaio que força a migração dos íons pelo concreto, conforme especificações propostas pela ASTM C 1202 (2012).

Como os problemas de deterioração ficam por conta de fontes externas, na maioria dos casos, a porosidade do concreto tem relação direta com a velocidade de penetração. Sendo assim, Uchoa *et al.* (2009) analisaram o comportamento de concretos com e sem adições minerais, e com duas relações água/cimento (0,4 e 0,6) quanto à penetração de cloretos. Os autores constataram que a mistura com adição mineral, em substituição parcial do cimento, com a menor relação a/c foi a que se mostrou mais eficiente para resistir à penetração de cloretos. Isso se justificou devido ao refinamento dos poros pela adição mineral e pela baixa relação a/c, o que dificultou a entrada dos íons cloreto no concreto.

A penetração dos cloretos no concreto também pode estar relacionada ao tipo de cimento utilizado. Os produtos formados pela hidratação do C_3A reagem com os íons cloreto, formando um sal insolúvel. Logo, concretos produzidos com cimentos com maiores teores de C_3A são mais resistentes à penetração de cloretos. Neste sentido, consumos maiores de cimento também disponibilizam proporcionalmente maior quantidade de C_3A . No entanto, ao substituir parte do clínquer por adições minerais, ocorre a redução da difusão dos cloretos, em virtude do refinamento da estrutura porosa do concreto (FIGUEIREDO, 2005).

Outra forma de avaliar a qualidade de um concreto em relação à durabilidade é através de ensaios não destrutivos. Estes permitem verificar a existência de possíveis problemas, sem causar danos ao elemento ensaiado. Existem várias técnicas de ensaio, porém durante o presente trabalho optou-se por realizar duas delas: a mensuração da resistividade elétrica e da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, as quais serão detalhadas nos próximos itens.

a) Resistividade elétrica

A resistividade elétrica consiste em uma propriedade que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, controlando sua difusão pelo concreto através da

solução aquosa presente nos poros, sendo sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura (HELENE, 1993; POLDER, 2001).

Essa propriedade, quando em conjunto com o processo de oxigenação das barras de aço da armadura, tende a controlar o processo eletroquímico de corrosão. Assim, a velocidade de corrosão das armaduras, e por consequência, a durabilidade das estruturas, estão diretamente ligadas à resistividade elétrica. As barras de aço imersas no concreto são mais propensas a atingir um estado de corrosão quando a resistividade é inferior a 10 k Ω .cm, e tendem a manter um comportamento passivo quando a resistividade do concreto é superior a 30 k Ω .cm (CASCUDO, 1997; MORRIS, *et al.*, 2002).

Cascudo (1997), assim como Whiting e Nagi (2003), estabelece que uma resistividade abaixo de 5 k Ω .cm indica uma probabilidade de corrosão muito alta, entre 5 a 10 k Ω .cm alta, entre 10 a 20 k Ω .cm baixa probabilidade e acima de 20 k Ω .cm o risco de corrosão torna-se desprezível.

A variação da resistividade elétrica do concreto está relacionada a diversos fatores como a relação água/aglomerante, a porosidade, presença de adições minerais e aditivos e o consumo de cimento (ANDRADE, 2004; HOPPE, 2005; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

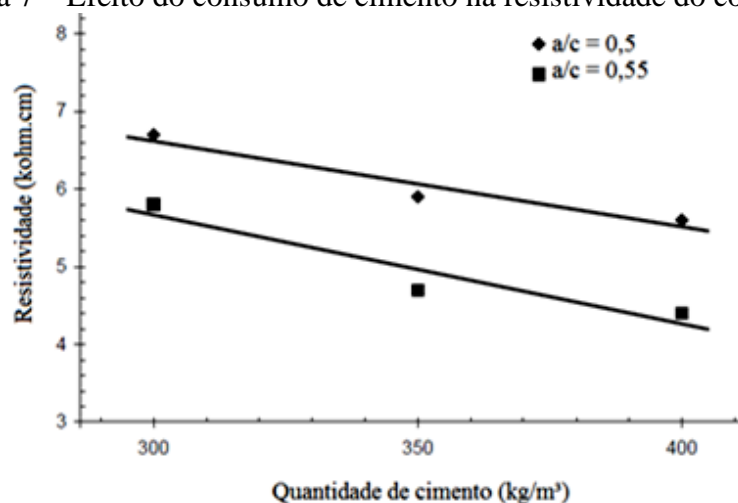
Em se tratando da relação água/aglomerante, Hoppe (2005) destaca que este é o principal parâmetro controlador das características do concreto que atua alterando a estrutura porosa da matriz hidratada. Dessa forma, a resistividade elétrica tende a reduzir com o aumento da porosidade provocada pela elevação da relação de água/aglomerante.

As adições minerais pozolânicas, como a cinza volante e a sílica ativa, ao serem introduzidas no concreto também alteram a microestrutura da matriz de cimento, a concentração iônica e a mobilidade de íons na solução dos poros, provocando variações na resistividade elétrica. A densificação da matriz do concreto reduz a quantidade de íons e dificulta a condução da corrente elétrica aumentando a resistividade elétrica (WHITING e NAGI, 2003; SANTOS, 2006).

Em relação à quantidade de cimento, Hughes⁶ (1985) *apud* Whiting e Nagi (2003) avaliou a resistividade elétrica de 12 misturas de concreto para duas relações água/cimento, variando também o consumo de cimento. O autor observou que quanto mais cimento menor a resistividade mensurada, ou seja, maior é a probabilidade de degradação do concreto, como demonstrado na Figura 7. Isso, pois o consumo de cimento determina o volume e a estrutura da pasta.

⁶ HUGHES, B.P.; SOLEIT, A.K.O.; BRIERLY, R.W., New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 133, p. 243 - 248, 1985.

Figura 7 – Efeito do consumo de cimento na resistividade do concreto



(Fonte: Adaptado de HUGHES *et al.*, 1985 *apud* WHITING e NAGI, 2003)

Polder (2001) produziu concretos com escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa e constatou que a resistividade elétrica desses concretos foi significativamente superior aos resultados das misturas de referência. Em condições saturadas, a resistividade dos concretos com as adições variou entre 30 kΩ.cm e 100 kΩ.cm, enquanto os concretos de referência atingiram no máximo 20 kΩ.cm.

Fennis (2011) avaliou a resistência elétrica de concretos ecológicos, com consumos de cimento na ordem de 110 kg/m³, os quais obtiveram resistividades aos 28 dias, em média, 2,5 vezes maiores do que os valores obtidos para o concreto de referência.

A verificação da resistividade elétrica do concreto pode ser dar por diversos métodos, sendo o método dos quatro eletrodos, denominado de método de Wenner (Figura 8), um dos mais utilizados (CHEN *et al.*, 2014).

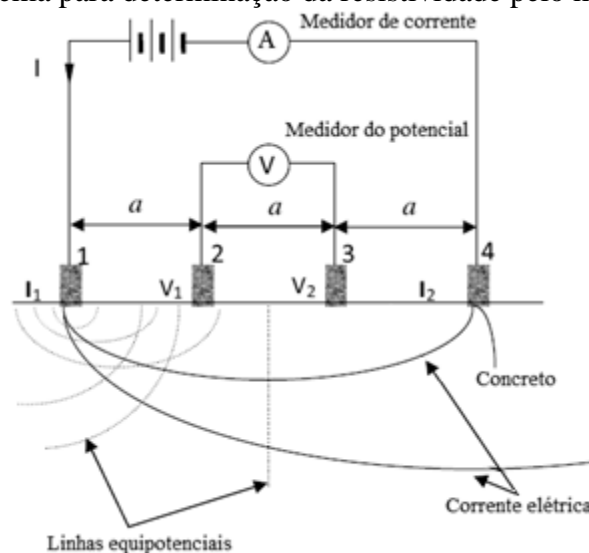
Essa técnica apresenta vantagens referentes ao posicionamento dos eletrodos e dos agregados, pois a medição ocorre nas camadas mais próximas da superfície do concreto. Sendo assim, a heterogeneidade do concreto, o tamanho e o espaçamento dos eletrodos e as dimensões dos corpos de prova são considerados fatores de influência. (WHITING e NAGI, 2003; SANTOS, 2006).

O ensaio consiste em aplicar uma corrente alternada, entre dois eletrodos externos, mensurando a diferença de potencial entre os dois eletrodos internos. Assim, a resistividade elétrica do concreto pode ser calculada pela Equação (15)

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \frac{U}{I} \quad (15)$$

Em que: ρ é a resistividade do concreto ($\Omega \cdot \text{cm}$); U é a tensão medida (Volts); I é a corrente aplicada (Ampere); α é a distância entre eletrodos (cm).

Figura 8 – Esquema para determinação da resistividade pelo método de Wenner



(Fonte: Adaptado de CHEN *et al.*, 2014)

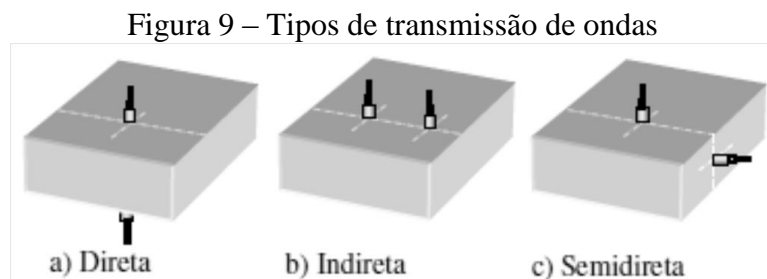
b) Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Uma das técnicas não destrutivas que vem sendo utilizadas para a avaliação da qualidade de estruturas de concreto é a aplicação de ondas ultrassônicas. O ensaio consiste em aplicar um pulso ultrassônico a fim de mensurar o tempo que esse pulso leva para atravessar a seção de concreto. Ao dividir o comprimento existente entre os transdutores pelo tempo de propagação do pulso obtêm-se a velocidade média da propagação da onda, sendo esse resultado influenciado pelas propriedades do material (EVANGELISTA, 2002; CAVALCANTI, 2010).

O ultrassom tem sua utilização relacionada ao fato de ser possível estabelecer o módulo de elasticidade dinâmico do concreto de forma não destrutiva. Além disso, esse ensaio possibilita estimar a uniformidade e presença de vazios detectados devido às diferenças de velocidade de propagação das ondas, as quais normalmente variam na frequência de 20 kHz a 150 kHz. Para concretos convencionais a velocidade de pulso geralmente fica entre 3700 a 4200 m/s, com uma distância de transdutores que pode variar de 10 a 30 cm (SILVA *et al.*, 2013).

No Brasil, as recomendações para execução do ensaio com pulso ultrassônico estão prescritas na NBR 8802 (ABNT, 1994), a qual descreve sucintamente o ensaio, estabelecendo

condições de preparação da superfície do concreto e tipos de transmissão das ondas. Existem três tipos de transmissão para a realização do ensaio de ultrassom, sendo elas direta, indireta e semidireta, como segue na Figura 9. Estas dependem das dimensões da estrutura, da precisão requerida e da variabilidade do concreto.



(Fonte: Silva *et al.*, 2013)

Segundo a NBR 8802 (ABNT, 1994), a transmissão direta consiste na configuração mais recomendada, pois permite às ondas serem recebidas com maior intensidade. Os outros tipos de transmissão só devem ser realizados quando não for possível aplicar a transmissão direta.

A norma americana ASTM C 597 (2009) demonstra pela Equação (16) o cálculo da velocidade da onda considerando as propriedades do concreto.

$$V = \sqrt{\frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho_{conc} \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (16)$$

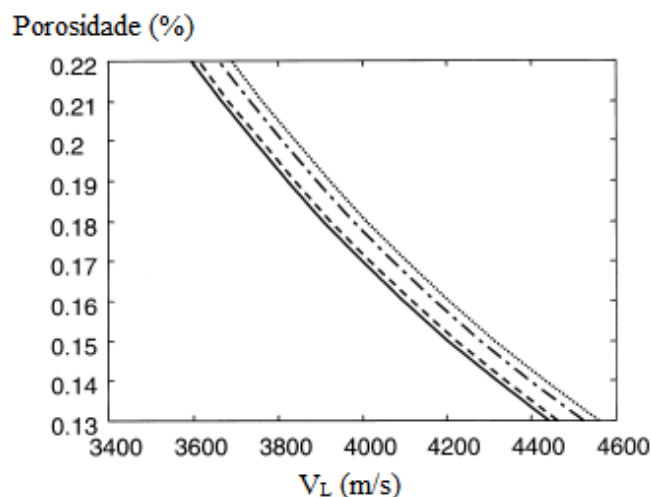
Em que: V é a velocidade da onda (km/s); E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (kN/mm²); ρ_{conc} é a massa específica do concreto (kg/m³); ν é o coeficiente de Poisson dinâmico (-).

Para determinar o módulo de elasticidade dinâmico a partir de leituras com ultrassom é necessário, então, conhecer a massa específica do concreto e o coeficiente de Poisson dinâmico. O primeiro pode ser determinado experimentalmente, no concreto em seu estado endurecido, conforme recomendações da NBR 9833 (ABNT, 2008), e os resultados normalmente variam de 2.000 kg/m³ a 2.800 kg/m³. Já o coeficiente de Poisson no concreto varia de 0,11 a 0,21 e geralmente adota-se o valor de 0,2 segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Hernández *et al.* (2000) avaliaram a porosidade do concreto comparando resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio e ultrassom de pastas de cimento e areia, com relações

a/c variando de 0,45 a 0,60. Os autores verificaram que quanto maior a velocidade que o pulso levava para atravessar o corpo de prova, menor era a porosidade da amostra, conforme apresentado na Figura 10. Como esperado, a pasta com relação a/c de 0,45 foi a que obteve a maior velocidade, de 4098,2 m/s e uma porosidade de 15,93%, valor 23% inferior à pasta com maior a/c, que atingiu velocidade de 3775,6 m/s e porosidade de 20,81%.

Figura 10 – Relação entre a porosidade e a velocidade de pulso ultrassônico

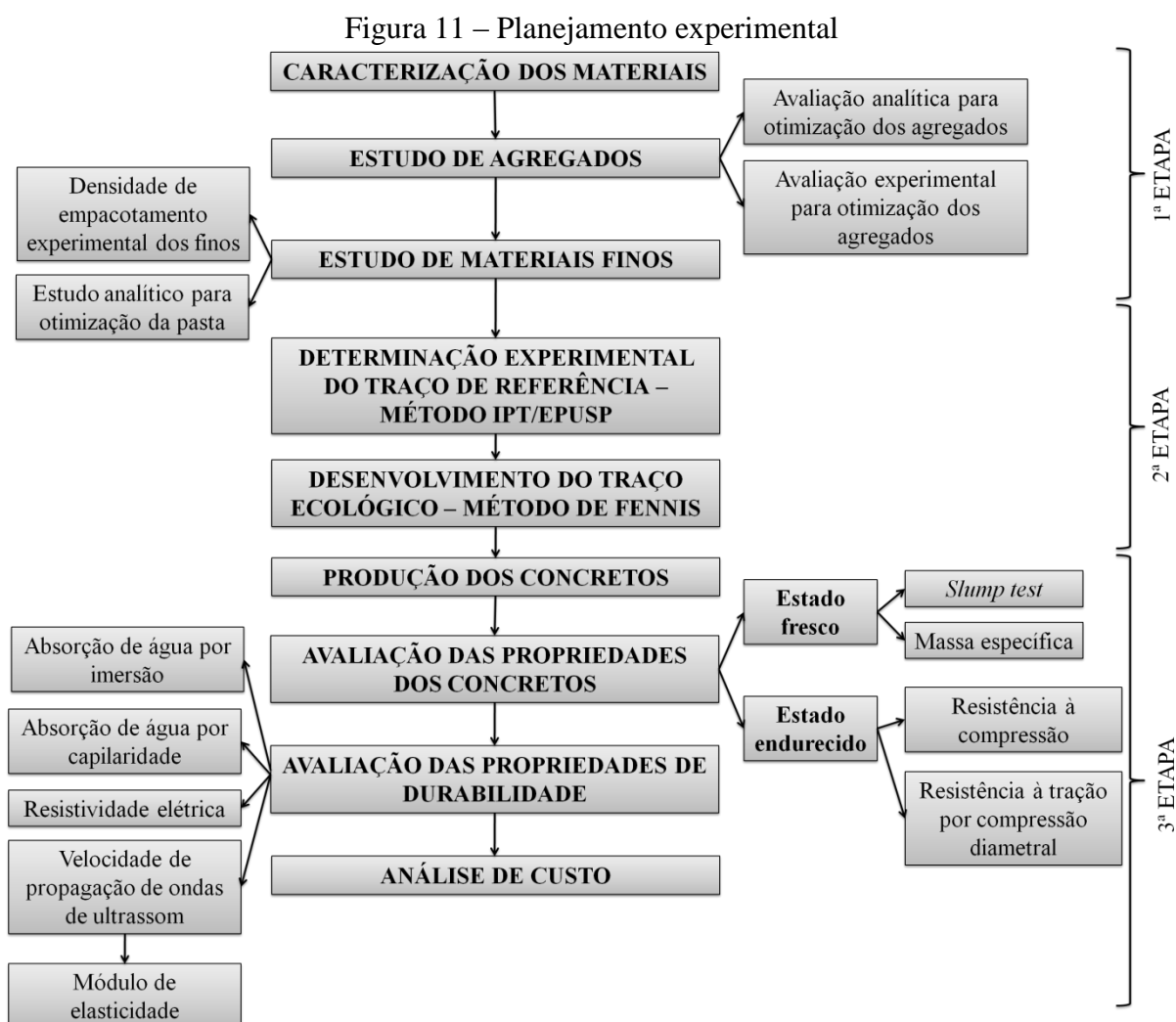


(Fonte: Adaptado HERNÁNDEZ *et al.*, 2000)

Haach *et al.* (2015) também utilizaram a técnica do ultrassom para a caracterização das propriedades mecânicas do concreto. O módulo de elasticidade dinâmico, calculado a partir dos resultados de ultrassom, foram 39,1% superiores ao ensaio de módulo de elasticidade estático realizado, apresentando menor variabilidade de resultados. Os autores constataram que o método ultrassônico é pouco suscetível à interferências externas em comparação com o ensaio estático, o que o torna mais adequado para o estudo do módulo de elasticidade do concreto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de se atingir os objetivos estabelecidos referentes à dosagem de um concreto ecológico utilizando um método baseado em empacotamento de partículas (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013b), a presente pesquisa foi dividida em três etapas. A primeira consiste em um estudo dos agregados (miúdos e graúdos) e dos materiais finos, a fim de se obter proporções que apresentem o menor índice de vazios entre as combinações estudadas. A segunda etapa compreende na determinação do traço de referência e desenvolvimento do traço ecológico. Por fim, a terceira etapa consiste na produção dos concretos seguido da caracterização quanto às suas propriedades em estado fresco e endurecido, assim como avaliação de propriedades de durabilidade e questões relativas ao custo de produção. A Figura 11 representa um fluxograma das etapas que compõem a campanha experimental do presente trabalho.



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Materiais finos

Foi utilizado o cimento Portland CII-F 32 por ser um cimento de aplicações gerais em vários tipos de obras. Esse cimento contém, no mínimo, 90% e, no máximo, 94% de clínquer e gipsita. O teor de fíler calcário varia entre 6% e 10% conforme a NBR 11578 (ABNT, 1991). A substituição de parte do clínquer por fíler contribui para a diminuição da emissão de CO₂ oriundo da sua produção. As principais características físicas, químicas e mecânicas desse material encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Características físicas, químicas e mecânicas do CII-F 32

Características químicas (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO livre	Perda ao fogo	Resíduo Insolúvel	Equivalente alcalino
60,30	18,73	4,32	2,76	4,87	2,60	1,36	4,65	1,32	0,70
Características físicas									
Massa específica (g/cm ³)	Início pega (h)	Fim pega (h)	Água de consistência de pasta (%)	Superfície esp. Blaine (m ² /kg)	Finura (%)		Resistência à compressão (MPa)		
					#200	#325	3 dias	7 dias	28 dias
3,11	03:29	04:11	26,6	329,6	2,15	11,35	28,0	34,2	41,1

(Fonte: Relatório de ensaio Itambé – mar/2015)

A sílica de casca de arroz (SCA) utilizada como adição mineral no presente trabalho é proveniente da queima controlada da casca de arroz, e é denominada de sílica pelo fato de passar por processo de combustão em leito fluidizado, sistema de automação e controle de temperatura, que permitem a extração da sílica da casca de arroz em seu formato amorfo, diferente da cinza de casca de arroz que não passa por controle de queima rigoroso (SÍLICA VERDE DO ARROZ LTDA, 2013). O material possui massa específica de 2,16g/cm³, superfície específica Blaine igual a 696 m²/kg e área BET de 14,70 m²/kg (GOBBI, 2014).

O pó de quartzo, comercialmente denominado de Sílica Moída 325, foi também utilizado como adição mineral no presente trabalho. Este apresenta massa específica de 2,6 g/cm³, superfície específica Blaine de 795 m²/kg e área BET de 1,23 m²/kg (GOBBI, 2014).

Para verificação do tamanho dos grãos do cimento e das adições minerais foi realizado ensaio de granulometria a laser. A amostra foi dispersa em um fluido (água para as adições minerais e álcool etílico para o cimento). Utilizou-se o equipamento do modelo CILAS 1064

com faixa de medição de 0,04-500 μm . Na Figura 12 estão dispostas as curvas granulométricas dos materiais finos e na Tabela 5 o diâmetro máximo dos materiais e os diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , os quais representam o diâmetro pelo qual passam 10, 50 e 90% das partículas dos materiais, respectivamente.

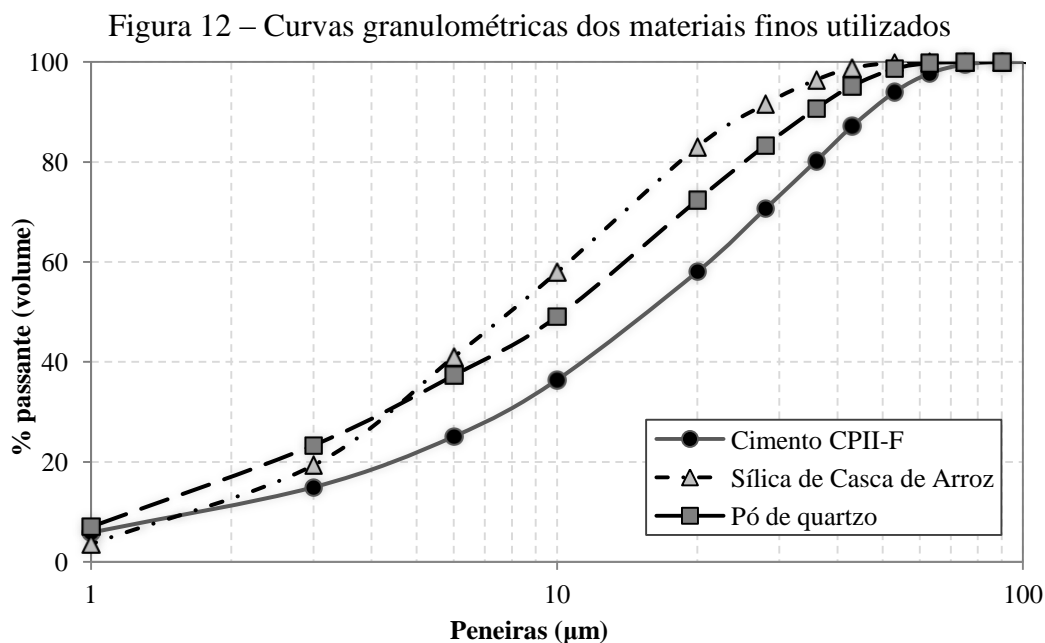


Tabela 5 – Diâmetros dos materiais finos

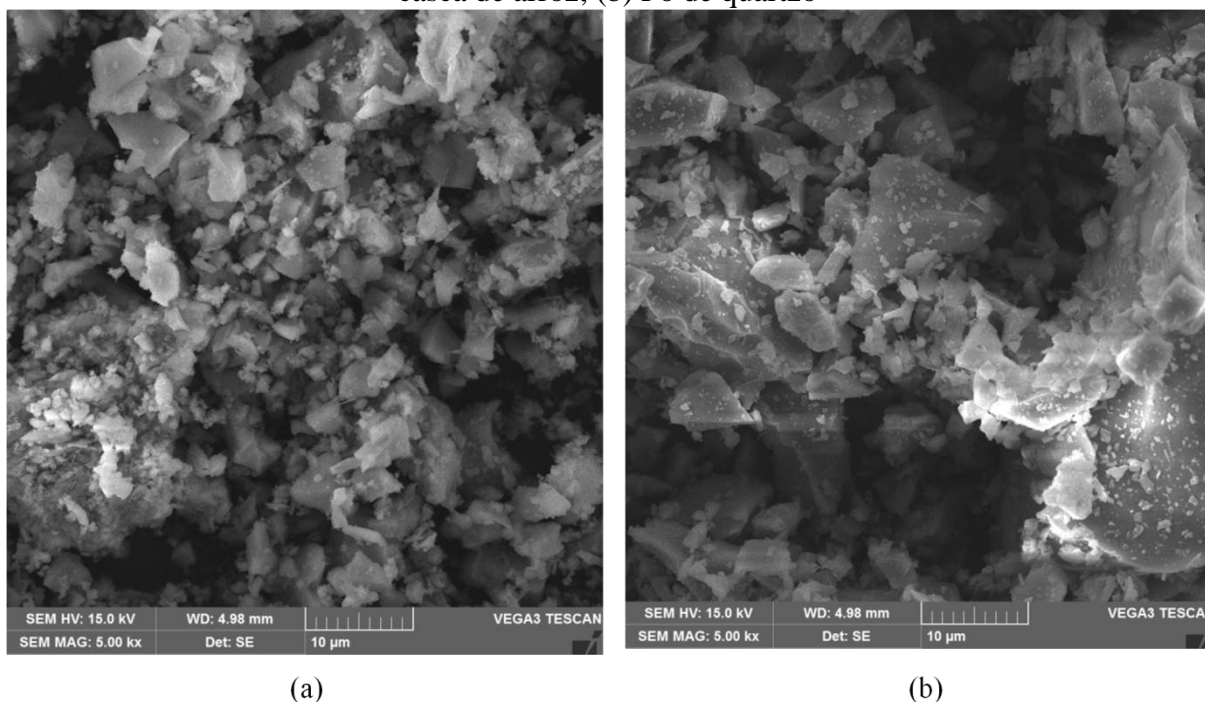
Material	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{\text{máx}}$ (μm)
Cimento CP-II-F	1,79	15,86	46,60	90,0
Sílica de casca de arroz	1,86	7,89	26,06	63,0
Pó de quartzo	1,31	10,34	35,07	75,0

Em relação aos resultados apresentados na Figura 12 e na Tabela 5 nota-se que a sílica de casca de arroz foi tida como o material mais fino, seguida pelo pó de quartzo e pelo cimento. Ao comparar o diâmetro D_{50} dos materiais finos com o diâmetro limítrofe de 25 μm descrito no modelo CIPM (item 2.2.4, página 23), nota-se que todos os materiais finos demonstraram tamanhos inferiores ao limite. Desse modo, espera-se que esses materiais apresentem interações entre partículas devido às forças de atração, podendo causar a formação de aglomerados.

O pó de quartzo e a sílica de casca de arroz foram submetidos ao ensaio com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para análise das pequenas partículas que compõem estas adições minerais. Foi utilizado o equipamento TESCAN VEGA3 LMU com

voltagem de 15 kV e aproximação de 5000 vezes das amostras, as quais passaram por metalização com ouro antes do ensaio. A Figura 13 apresenta as imagens obtidas com o MEV.

Figura 13 – Imagens de MEV das adições minerais com ampliação de 5000x: (a) Sílica de casca de arroz; (b) Pó de quartzo



Através da análise das imagens obtidas pelo ensaio com o MEV observa-se que a sílica de casca de arroz é mais fina, em sua maioria, do que o pó de quartzo, fato também evidenciado pelas curvas granulométricas dos dois materiais. Ambos apresentaram grãos angulosos e com muitas arestas. Não foram feitas medidas exatas de forma das partículas, devido à dificuldade em se isolar um grão no conjunto, já que as partículas encontram-se bastante aglomeradas.

3.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado para a produção do concreto foi uma areia industrial de granito originária da região de Curitiba/PR. Para a sua caracterização foram realizados os seguintes ensaios:

- Material pulverulento, segundo a NBR NM 46 (ABNT, 2003);
- Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003);

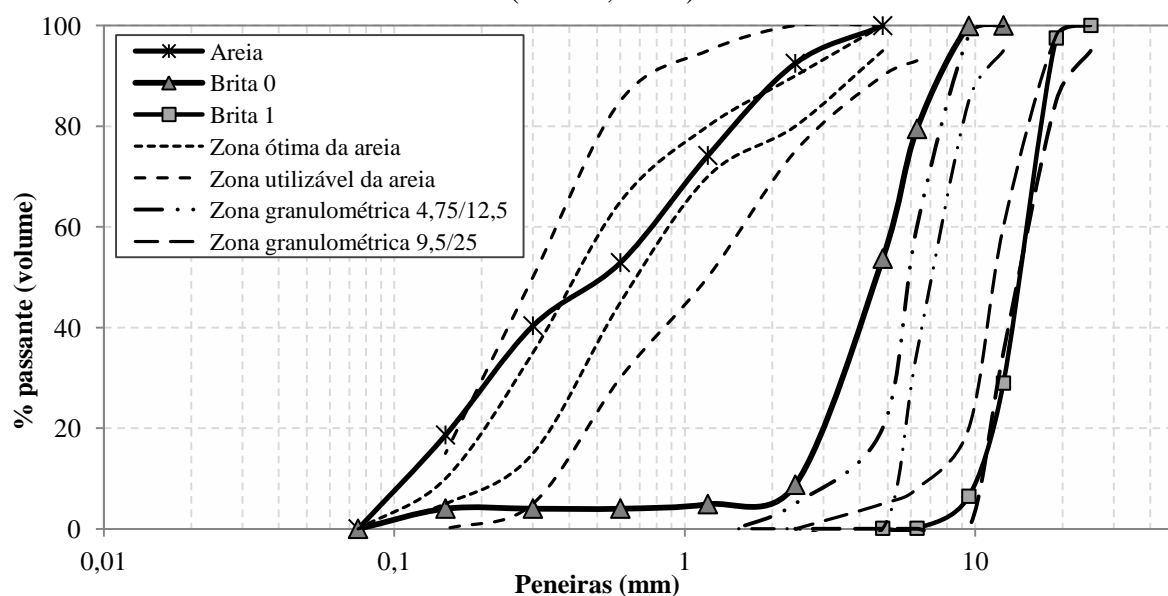
- Massa unitária compactada e índice de vazios, segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Massa específica, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- Absorção de água, segundo a NBR NM 30 (ABNT, 2001).

Foram selecionados dois agregados graúdos, sendo estes a brita 0 e a brita 1, devido à sua ampla utilização no mercado da construção civil. A brita 0 é de origem calcária e a brita 1 de origem basáltica, ambas proveniente da região de Curitiba/PR. A caracterização seguiu as recomendações das normas brasileiras vigentes para os seguintes ensaios:

- Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Massa unitária compactada e índice de vazios, segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Massa específica e absorção de água, segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009);
- Índice de forma, segundo a NBR 7809 (ABNT, 2006).

Os ensaios de caracterização dos agregados foram repetidos três vezes, obtendo como valor final a média dos resultados. As curvas granulométricas da areia, brita 0 e brita 1, com as respectivas zonas granulométricas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) seguem apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Curva granulométrica dos agregados e zonas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009)



A partir da Figura 14 nota-se que a areia e a brita 1 encontram-se inseridas nas zonas utilizáveis correspondentes a cada material, segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), diferentemente da brita 0, que apresenta-se fora da zona recomendada pela referida norma. Consta-se também que a brita 1 apresenta uniformidade dos grãos, verificada pela pequena inclinação da curva granulométrica, que encontra-se bastante vertical.

Na Tabela 6 estão descritos as médias dos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados. Os resultados completos, para todas as amostras, estão dispostos no Apêndice C.

Tabela 6 – Resultado da caracterização dos agregados

Propriedades		Areia	Brita 0	Brita 1
Granulometria (% retida)	Peneiras (mm)	0,0	0,0	0,0
	25	0,0	0,0	0,0
	19	0,0	0,0	2,49
	12,5	0,0	0,0	68,56
	9,5	0,0	0,10	22,48
	6,3	0,0	20,45	6,36
	4,8	0,04	25,78	0,00
	2,4	7,49	44,93	0,0
	1,2	18,31	3,84	0,0
	0,6	21,27	0,88	0,0
	0,3	12,55	0,0	0,0
	0,15	21,70	0,0	0,0
Diâmetro máximo característico (mm)		4,8	9,5	19
Módulo de finura (-)		2,22	5,21	6,95
Massa específica seca (g/cm³)		2,62	2,80	2,67
Massa unitária compactada seca (g/cm³)		1,723	1,711	1,517
Índice de vazios (%)		0,342	0,388	0,430
Densidade de empacotamento (-)*		0,658	0,612	0,570
Absorção de água (%)		0,40	0,57	0,28
Material pulverulento (%)		8,17	1,37	0,64
Índice de forma (-)		-	-	2,16

* Densidade de empacotamento calculada conforme Equação (3) previamente apresentada no item 2.2.3

Através da caracterização dos agregados, observa-se que a areia apresenta a maior densidade de empacotamento, seguida pela brita 0 e brita 1. Paralelamente, nota-se que a areia também apresentou maior quantidade de material pulverulento, seguida da brita 0 e brita 1.

3.1.3 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o Glenium 51, produzido pela BASF. É um aditivo superplastificante líquido, de terceira geração, cuja base química é composta por éter

policarboxílico. Este aditivo possui pH de 5 – 7 e densidade de 1.087 kg/m³, conforme especificações técnicas do produto (BASF, 2015).

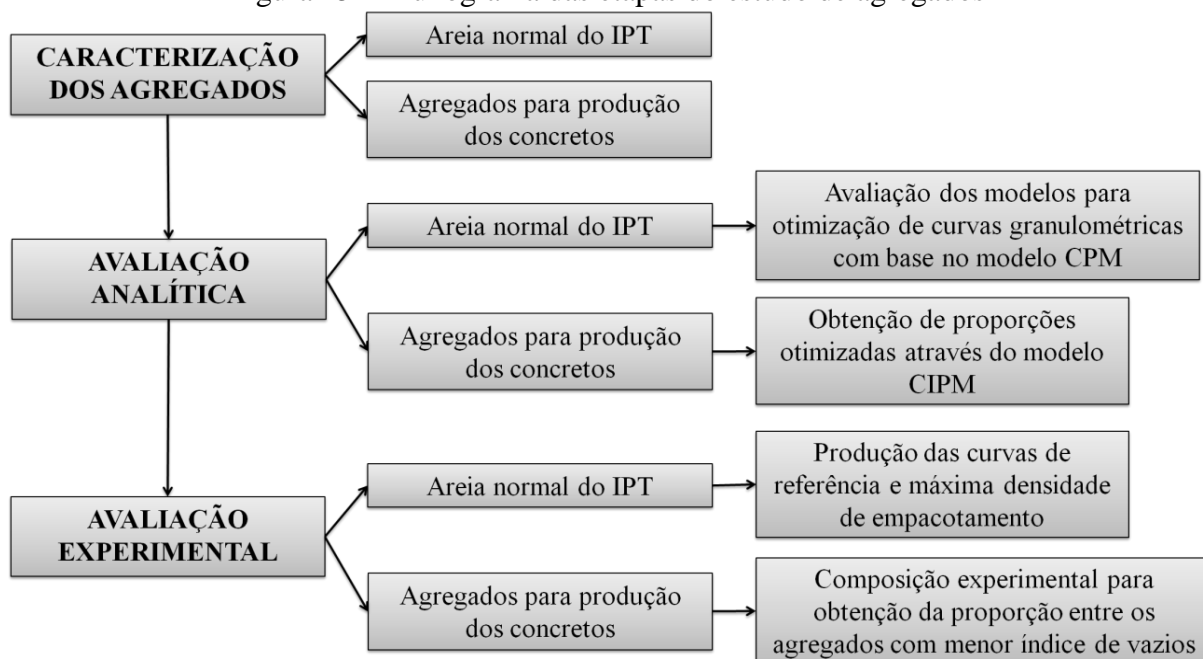
3.2 ESTUDO DE AGREGADOS

Para se obter a melhor composição granulométrica dos agregados utilizados, este estudo foi dividido em duas etapas. A primeira constituiu-se em uma avaliação de modelos de empacotamento de partículas para otimização de agregados, analisando qual modelo desenvolve uma curva com máxima densidade de empacotamento.

Em um primeiro estudo, utilizou-se a areia normal do IPT como agregado miúdo. A partir disso, deu-se seguimento à uma segunda parte, onde foi obtida a proporção otimizada dos materiais granulares que compõem o presente estudo, areia e britas.

A segunda etapa consistiu em uma verificação analítica e experimental de proporções aleatórias entre os agregados utilizados, a fim de se obter aquela com o menor índice de vazios. O fluxograma da Figura 15 indica as etapas do estudo de agregados, as quais foram precedidas pela caracterização dos materiais conforme apresentado no item 3.1.2 (página 41).

Figura 15 – Fluxograma das etapas do estudo de agregados



3.2.1 Avaliação analítica para otimização dos agregados

a) Areia normal do IPT

A obtenção de esqueletos granulares compactos pode ser alcançada através do uso de modelos de empacotamento de partículas que permitam estabelecer a proporção e tamanho adequados dos agregados, de modo a obter um conjunto com um baixo índice de vazios. Diversos são os modelos existentes, cada qual considerando efeitos geométricos e de interação entre grãos, resultando em diferentes valores de densidades de empacotamento.

Desse modo, buscou-se avaliar os modelos propostos por Füller e Thompson, Andreassen e Andersen, ambos descritos por Fennis (2011), e Funk e Dinger (1980) buscando determinar qual dos modelos utilizados irá produzir uma curva granulométrica com o menor índice de vazios. É feita menção quanto às características e procedimento de cálculo de cada modelo no item 2.2.2, previamente apresentado.

Para o estudo dos modelos, utilizou-se a areia normal brasileira fornecida pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) como agregado miúdo. Essa areia é empregada como material de referência para a realização de ensaios físicos e mecânicos de cimento Portland e está disponível em quatro frações: areia grossa (1,2 mm), média grossa (0,6 mm), média fina (0,3 mm) e fina (0,15 mm). A areia normal utilizada segue as especificações estabelecidas na norma NBR 7214 (ABNT, 2012). Sua massa específica é igual a 2.618 kg/m^3 , tendo sido determinada segundo a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009). A massa unitária de cada classe, determinada pelo método A (estado compactado) descrito na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), assim como a densidade de empacotamento (β_i) de cada uma das quatro classes de tamanhos de grãos, encontram-se apresentadas na Tabela 7. Determinou-se a massa unitária de cada classe três vezes, obtendo como valor final a média dos resultados. A densidade de empacotamento das classes foi estabelecida segundo Equação (3), apresentada item 2.2.3 (página 20).

Tabela 7 – Massa unitária e densidade de empacotamento das classes da areia

Propriedade	Classes (mm)			
	1,2	0,6	0,3	0,15
Massa unitária (kg/m^3)	1.155	1.127	1.110	1.100
Desvio padrão (kg/m^3)	1,22	1,27	1,42	1,94
Densidade de empacotamento, β_i (-)	0,441	0,430	0,424	0,420

Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstram, para esse material em estudo, que quanto maior o tamanho dos grãos que compõem a classe, maior a massa unitária e a densidade de empacotamento encontrada. Isso pode dever-se a pequenas alterações de forma das partículas da areia normal do IPT e seu arranjo espacial no conjunto. Além disso, quanto mais finos os grãos, menor será a influência da gravidade, de modo que a interação entre partículas se torna cada vez mais importante (YU *et al.*, 2003), podendo colaborar para o aumento da quantidade de vazios.

Observa-se também que as densidades de empacotamento obtidas para cada classe apresentam valores sempre menores que 0,450. Este valor pode ser considerado baixo, sabendo-se que a máxima densidade de empacotamento que se atinge em misturas com grãos uniformes é igual a 0,740 (DE LARRARD, 1999). Esta densidade de empacotamento máxima é alcançada considerando o empacotamento de uma rede cúbica de face centrada de partículas perfeitamente esféricas, onde cada partícula foi posicionada no sistema uma a uma. Desse modo, quando se tem um conjunto granular formado a partir de condições diferentes das ideais apontadas, como é o caso da areia estudada, os valores encontrados são naturalmente menores que o valor máximo.

A partir disso, aplicaram-se os modelos de empacotamento sendo utilizado um coeficiente de distribuição q igual a 0,5 para o cálculo da curva granulométrica segundo Fuller e Thompson. Já para Andreasen e Andersen e Funk e Dinger, adotou-se q igual a 0,37. Elaborou-se também uma curva média dos limites inferior e superior da zona ótima recomendada pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009). Como a norma brasileira considera porcentagens retidas das frações 4,8 e 2,4 mm, as quais não são disponibilizadas pela areia normal do IPT, optou-se por considerar que não houve material retido nessas frações possibilitando a comparação de resultados. Entretanto, para a aplicação dos modelos foi utilizado um diâmetro máximo de 2,4 mm, pois ao calcular o volume de cada fração, os modelos consideram sempre que o diâmetro máximo não apresenta porcentagem retida, excluindo da composição estes grãos. Caso não fosse utilizado o diâmetro máximo de 2,4 mm, a fração de 1,2 mm iria apresentar uma porcentagem de partículas igual a zero, o que impossibilitaria utilizar as quatro frações da areia normal do IPT.

A partir das curvas granulométricas resultantes dos modelos e da densidade de empacotamento das classes individuais da areia, calculou-se a densidade de empacotamento dos conjuntos referentes a cada curva granulométrica construída, utilizando para isto o modelo analítico CPM (DE LARRARD, 1999), descrito em detalhes no item 2.2.3. O índice de compactação K utilizado no cálculo da densidade de empacotamento real foi igual a 4,5,

dado pelo autor e correspondente ao processo de compactação por apiloamento, conforme indicado previamente na Tabela 2 (página 22).

b) Agregados para produção dos concretos

Após o estudo com a areia normal do IPT e tendo sido determinado qual o modelo de empacotamento que apresenta os melhores resultados, este foi empregado para otimizar a curva granulométrica dos agregados utilizados na dosagem do concreto ecológico do presente trabalho (brita 1, brita 0 e areia). Foi realizado, inicialmente, o peneiramento e separação das frações dos três agregados para compor uma mistura com 10 classes, com diâmetros de 19 mm a 0,15 mm. No entanto, os agregados apresentam tamanhos de grãos em comum, por isso, optou-se por selecionar o material cuja fração apresentou maior porcentagem retida, obtida no ensaio de granulometria (item 3.1.2).

Para exemplificar, a brita 1 possui 6,36% de material retido na peneira de 6,3mm, já a brita 0 apresentou 20,45% de material retido nessa peneira, sendo assim, selecionou-se a fração de brita 0 para compor a mistura dos agregados. Desse modo, realizou-se a verificação da densidade de empacotamento de cada classe pela Equação (3) e através da massa unitária compactada, cujo ensaio, realizado segundo o método A descrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006), foi repetido três vezes obtendo como valor final a média dos resultados, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Densidade de empacotamento de cada classe de agregados

Agregado	Brita 1			Brita 0			Areia			
Diâmetro máximo das classes (mm)	19	12,5	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15
Massa unitária (kg/m³)	1,510	1,509	1,520	1,673	1,675	1,657	1,401	1,406	1,380	1,435
Desvio padrão (kg/m³)	0,012	0,018	0,015	0,006	0,005	0,008	0,003	0,002	0,004	0,002
Densidade de empacotamento (-)	0,568	0,567	0,572	0,629	0,630	0,623	0,535	0,537	0,527	0,548

Através da Tabela 8 nota-se que, de uma forma geral, para esses agregados, quanto maior o tamanho dos grãos que compõem a classe, maior a massa unitária e a densidade de empacotamento encontrada. Isso pode ser justificado por alterações de forma entre as partículas, uma vez que a rocha originária dos três agregados é diferente. Quanto mais finos os grãos, menor será a influência da gravidade, de modo que a interação entre as partículas se

torna cada vez mais importante podendo colaborar para o aumento da quantidade de vazios (YU *et al.*, 2003; FENNIS, 2011).

Com a densidade de empacotamento de cada classe de agregado, utilizou-se o modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1980) determinado no estudo com a areia normal do IPT para otimizar a mistura, calculando a densidade de empacotamento do conjunto. Como os agregados serão utilizados para produção do concreto ecológico, cuja dosagem seguirá o modelo de Fennis (FENNIS 2011; FENNIS *et al.*, 2013b), os cálculos de densidade de empacotamento envolvendo esses materiais foram realizados pelo modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a), descrito em detalhes no item 2.2.4.

Após ter sido determinada a curva ótima dos agregados (areia e britas), buscou-se uma maneira de montar essa curva sem precisar peneirar todo o material necessário à produção dos concretos. Isso é importante para evitar o peneiramento dos agregados, em função do tempo e da grande quantidade de material que essa tarefa demanda. Assim, buscou-se encontrar uma proporção, de forma aleatória e considerando cada tipo de agregado como uma única classe de grãos, que apresente resultado de densidade de empacotamento semelhante à densidade de empacotamento encontrada para a mistura otimizada, com todas as classes de grãos.

Para isso, manteve-se a relação entre as britas constante (relação obtida experimentalmente, cujos resultados serão apresentados no item 3.2.2) e variou-se a quantidade de areia a cada 5%, pelo fato de ser o material mais fino e com a maior densidade de empacotamento conforme observado na Tabela 6 (página 43). Quando os resultados se aproximaram da densidade de empacotamento equivalente à curva granulométrica otimizada pelo modelo Funk e Dinger (1980), a variação na quantidade de areia passou a ser de 1% em 1%, a fim de encontrar a proporção com o valor mais próximo. Após cada variação na quantidade de areia, o modelo CIPM (FENNIS, 2011, 2013a) era utilizado para determinar a densidade de empacotamento do conjunto.

3.2.2 Avaliação experimental para otimização dos agregados

a) Areia normal do IPT

As curvas granulométricas obtidas pelas composições com a areia normal do IPT, e pelas combinações dos agregados utilizados na produção do concreto ecológico, foram reproduzidas em laboratório. Para isso, realizou-se o ensaio de massa unitária pelo método A (estado compactado) descrito na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). A partir deste, foi

possível determinar a densidade de empacotamento experimental da mistura, através da Equação (3) previamente apresentada no item 2.2.3, possibilitando a comparação dos resultados experimentais com os valores obtidos teoricamente pelo uso do modelo analítico CIPM.

Com a areia normal do IPT, foram reproduzidas as misturas estabelecidas a partir da curva da média dos valores recomendados para a zona ótima da norma NBR 7211 (ABNT, 2009) e o conjunto granular dado pelo modelo de Funk e Dinger, o qual resultou na máxima densidade de empacotamento analítica.

b) Agregados para produção dos concretos

Com o mesmo intuito de se obter uma curva granulométrica compacta, com máxima densidade de empacotamento, realizou-se um procedimento de empacotamento dos agregados que foram utilizados para a produção do concreto ecológico. O ensaio consiste em executar misturas sucessivas, variando a proporção dos materiais e, através do ensaio de massa unitária no estado compactado, determinar a proporção de materiais com menor índice de vazios (REBMANN, 2011; RECENA, 2011). Dessa forma, descreve-se a seguir as etapas do ensaio para otimização da brita 1 e brita 0, e posteriormente das duas britas com acréscimo da areia.

Para estabelecer a composição otimizada de brita 1 e brita 0, adotou-se uma massa fixa de brita 1 (agregado A) suficiente para preencher o recipiente de massa unitária, com um volume de 14,96 dm³. Em seguida, acrescentou-se a quantidade necessária de brita 0 (agregado B) para compor as várias proporções testadas. A quantidade a ser acrescentada de agregado B, a cada nova proporção, pode ser calculada pela Equação (17) (REBMANN, 2011).

$$m_B^i = \left[\left(m_A \cdot \frac{100}{\%m_A^i} \right) - m_A \right] - m_B^{i-1} \quad (17)$$

Em que: m_B^i é a massa a ser adicionada do agregado B na etapa i (kg); m_A é a massa do agregado A (kg); $\%m_A^i$ é porcentagem (em massa) correspondente à proporção do agregado A na etapa i ; m_B^{i-1} é a massa do agregado B acrescida na etapa anterior (kg);

Na Tabela 9 estão apresentadas as proporções entre as duas britas e as massas calculadas para composição das misturas.

Tabela 9 – Proporções de brita 1 e brita 0 para ensaio de empacotamento dos agregados

Etapa (i)	% Material A (brita 1)	% Material B (brita 0)	m_A(kg)	m_Bⁱ(kg)	Massa total (kg)
1	100	0	20,00	0,00	20,00
2	90	10	20,00	2,22	22,22
3	80	20	20,00	5,00	25,00
4	70	30	20,00	8,57	28,57
5	60	40	20,00	13,33	33,33
6	50	50	20,00	20,00	40,00
7	40	60	13,33	20,00	33,33
8	30	70	8,57	20,00	28,57
9	20	80	5,00	20,00	25,00
10	10	90	2,22	20,00	22,22
11	0	100	0,00	20,00	20,00

Nota-se que à medida que a porcentagem de brita 1 vai decrescendo, os acréscimos de brita 0 são cada vez maiores. Assim, por razões de economia de materiais optou-se por realizar o procedimento em duas partes, partindo de 100% de brita 1 até 50%, acrescentando brita 0. E, depois, partindo de 100% de brita 0 e acrescentando brita 1 até 50%.

Em cada proporção, as duas britas foram homogeneizadas em betoneira, com tempo de mistura de 2 minutos, realizando o ensaio de massa unitária, repetido por duas vezes para cada proporção, obtendo a média como resultado final. O índice de vazios foi calculado conforme Equação (18) baseada na NBR NM 45 (ABNT, 2006).

$$E_v = 100 - \left[\left(\frac{\%A}{\rho_A} + \frac{\%B}{\rho_B} \right) \cdot m_{mag} \right] \quad (18)$$

Em que: E_v é o índice de vazios (%); $\%A$ e $\%B$ são as porcentagens dos materiais A e B, respectivamente; ρ_A e ρ_B são as massas específicas dos agregados A e B, respectivamente (kg/m^3); m_{mag} é a massa unitária da mistura de agregados (kg/m^3).

A segunda parte do ensaio consistiu em estabelecer a mistura otimizada entre as duas britas e a areia. Para isso, elaborou-se uma nova planilha de cálculo (Tabela 10), em que a proporção ótima das duas britas passa a ser considerada como o material A, e a areia corresponde ao material B. Repetem-se os passos descritos no procedimento de ensaio para a obtenção da melhor mistura entre as duas britas, a qual representará a mistura otimizada entre os três agregados.

Tabela 10 – Proporções para ensaio de empacotamento dos três agregados

Etapas (i)	% Material A (brita 1 + brita 0)	% Material B (areia)	m_A(kg)	m_Bⁱ(kg)	Massa total (kg)
1	100	0	20,00	0,00	20,00
2	90	10	20,00	2,22	22,22
3	80	20	20,00	5,00	25,00
4	70	30	20,00	8,57	28,57
5	60	40	20,00	13,33	33,33
6	50	50	20,00	20,00	40,00
7	40	60	13,33	20,00	33,33
8	30	70	8,57	20,00	28,57
9	20	80	5,00	20,00	25,00
10	10	90	2,22	20,00	22,22
11	0	100	0,00	20,00	20,00

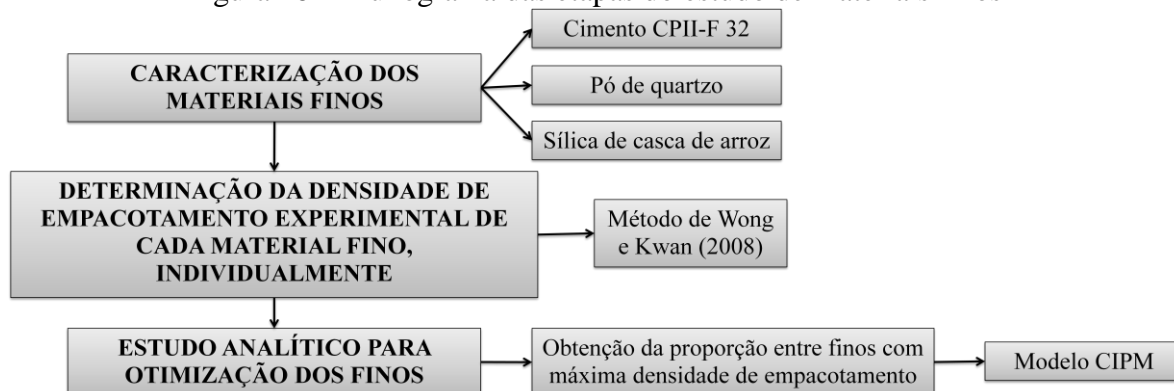
3.3 ESTUDO DE MATERIAIS FINOS

Semelhantemente aos agregados, realizou-se um estudo dos materiais finos que compreendem o presente estudo, sendo eles o cimento Portland CII-F 32, o pó de quartzo e a sílica de casca de arroz, a fim de se obter uma proporção entre materiais que apresente a máxima densidade de empacotamento.

Inicialmente efetuou-se um procedimento experimental para obtenção da densidade de empacotamento individual de cada material. Em seguida, e a partir dos resultados experimentais, verificou-se analiticamente as melhores proporções entre os materiais, em que cada material será considerado como uma classe individual de grãos, como forma de otimizar a composição da pasta do concreto a ser dosado.

O fluxograma da Figura 16 indica as etapas do estudo de agregados, as quais foram precedidas pela caracterização dos materiais conforme apresentado no item 3.1.1 (página 39).

Figura 16 – Fluxograma das etapas do estudo de materiais finos



3.3.1 Determinação da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos

Em se tratando do empacotamento de materiais finos, além das características dos grãos e do método de compactação utilizado, a aglomeração que as partículas sofrem também deve ser considerada. Isto ocorre, pois esses materiais estão sujeitos às forças de atração de van der Waals. A forma mais usual e efetiva de promover a dispersão das partículas finas é através do uso de aditivos superplastificantes, os quais podem agir por repulsão eletrostática associada ao efeito estérico (METHA e MONTEIRO, 2008).

Como a água e o aditivo influenciam a interação das partículas finas e a formação de aglomerados pode alterar o estudo desses materiais, a densidade de empacotamento deve ser mensurada considerando as mesmas condições de produção e aplicação, ou seja, na condição úmida (WONG e KWAN, 2008).

Para otimizar a proporção entre os materiais finos (cimento, pó de quartzo e sílica de casca de arroz) utilizados neste trabalho, aplicou-se o modelo CIPM para calcular a densidade de empacotamento de uma mistura, cuja proporção apresente menor quantidade de vazios.

Inicialmente foi necessário determinar a densidade de empacotamento de cada um dos materiais, dado necessário para alimentar o modelo CIPM, optando pelo uso do método proposto por Wong e Kwan (2008), descrito no item 2.2.5. Este foi escolhido, pois permite a determinação da densidade de empacotamento de partículas finas na condição úmida e na presença de aditivos superplastificantes. O procedimento de mistura das pastas produzidas foi adaptado de recomendações dos autores do método, tendo sido realizado em argamassadeira de misturador mecânico, e está descrito na Tabela 11.

Tabela 11 – Procedimento de mistura das pastas

Materiais	Tempo	Velocidade
50% Material fino + 80% Água + 50% Aditivo	3 min	Lenta
12,5% Material fino + 5% Água + 12,5% Aditivo	3 min	Lenta
12,5% Material fino + 5% Água + 12,5% Aditivo	3 min	Lenta
12,5% Material fino + 5% Água + 12,5% Aditivo	3 min	Lenta
12,5% Material fino + 5% Água + 12,5% Aditivo	3 min	Lenta

O procedimento da Tabela 11 permite alcançar a mistura homogênea dos materiais em pouco tempo. Na primeira etapa de mistura os autores sugerem adicionar 100% da água. Porém, após testes realizados durante o andamento do presente trabalho, optou-se por fracionar o acréscimo de água em 80% na primeira etapa, e 5% nas etapas seguintes, o que melhorou a qualidade de mistura da pasta.

Para a determinação da densidade de empacotamento da pasta na condição úmida, utilizou-se um recipiente de volume conhecido, igual a 399,67 cm³. Este foi preenchido em duas camadas, com aplicação de 30 golpes por camada em mesa *flowtable*, comumente utilizada na determinação do índice de consistência de argamassas. O procedimento de compactação adotado visou padronizar os golpes, o que não se observa no caso de compactação com soquete metálico, em que a influência do operador é maior. A compactação adotada se mostrou eficiente tanto para as pastas mais secas quanto para as que apresentaram mais água na composição.

É importante ressaltar que no ensaio de determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos, encontra-se a relação água/sólidos (a/s) correspondente à pasta cuja concentração de sólidos é máxima. Esta relação a/s é a mínima necessária à formação de uma pasta homogênea. Finalmente, a quantidade de aditivo superplastificante foi mantida constante em 1,2% sobre a massa de finos em todas as pastas, sendo este o valor obtido através das informações fornecidas pelo fabricante.

Após a compactação foi feito o arrasamento da superfície do recipiente e registrado a massa da pasta em seu interior para o cálculo da relação de vazios e da concentração de sólidos, cujo valor máximo corresponde à densidade de empacotamento de cada material (β), sendo utilizado como dado de entrada pelos modelos de empacotamento CPM (DE LARRARD, 1999) ou CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a).

3.3.2 Estudo analítico para otimização da pasta do concreto ecológico

O estudo analítico da proporção de finos visou a otimização da pasta do concreto ecológico, pela verificação da densidade de empacotamento de diferentes proporções entre os materiais finos utilizados. Assim, a partir dos dados experimentais determinados segundo o item 3.3.1, os três materiais (cimento, sílica de casca de arroz e pó de quartzo) foram combinados, utilizando-se então o modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a) para a determinação da densidade de empacotamento do conjunto. O modelo CIPM encontra-se descrito no item 2.2.4. Este modelo foi escolhido por ser o modelo base para o método de dosagem do concreto ecológico e por considerar a aglomeração dos finos em suas equações. Simulou-se a combinação de pastas ternárias (cimento e as duas adições) variando a quantidade de cimento gradativamente, e aumentando as proporções dos outros finos de 5% em 5%, em volume. Limitou-se o uso da sílica de casca de arroz em no máximo 10%, devido à sua elevada finura e à autores que abordam uma quantidade limite para essa adição,

conforme discussões estabelecidas anteriormente no item 2.1.2. Quando o resultado da densidade de empacotamento se aproximou do seu valor máximo a variação do volume de cada material foi refinada para 1%.

Sendo assim, os dados necessários para aplicação do modelo compreendem na densidade de empacotamento individual de cada material (β), determinados segundo o item 3.3.1, e o diâmetro das partículas. Para este último foi adotado o diâmetro D_{50} obtido no ensaio de granulometria a laser, conforme Tabela 5 (página 40), previamente apresentada. Utilizou-se o índice de compactação K igual a 12 (Tabela 2, página 22) para a determinação da densidade de empacotamento real, correspondente ao processo de compactação denominado Proctor Teste (FENNIS, 2011). Este se assemelha à rotina adotada para o adensamento da pasta através de *flowtable*, conforme método experimental de Wong e Kwan (2008).

3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

O presente estudo visa produzir um concreto ecológico com redução do consumo de cimento, através do método de dosagem proposto por Fennis (2011, 2013b), a fim de comparar suas propriedades com um concreto convencional. Dessa forma, elaborou-se um planejamento experimental que compreende a dosagem de um concreto de referência e de dois concretos ecológicos. Para cada concreto produzido, foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, os quais serão descritos mais adiante. A quantidade de corpos de prova moldados para cada concreto está descrita na Tabela 12.

Tabela 12 – Quantidade de corpos de prova para a campanha experimental

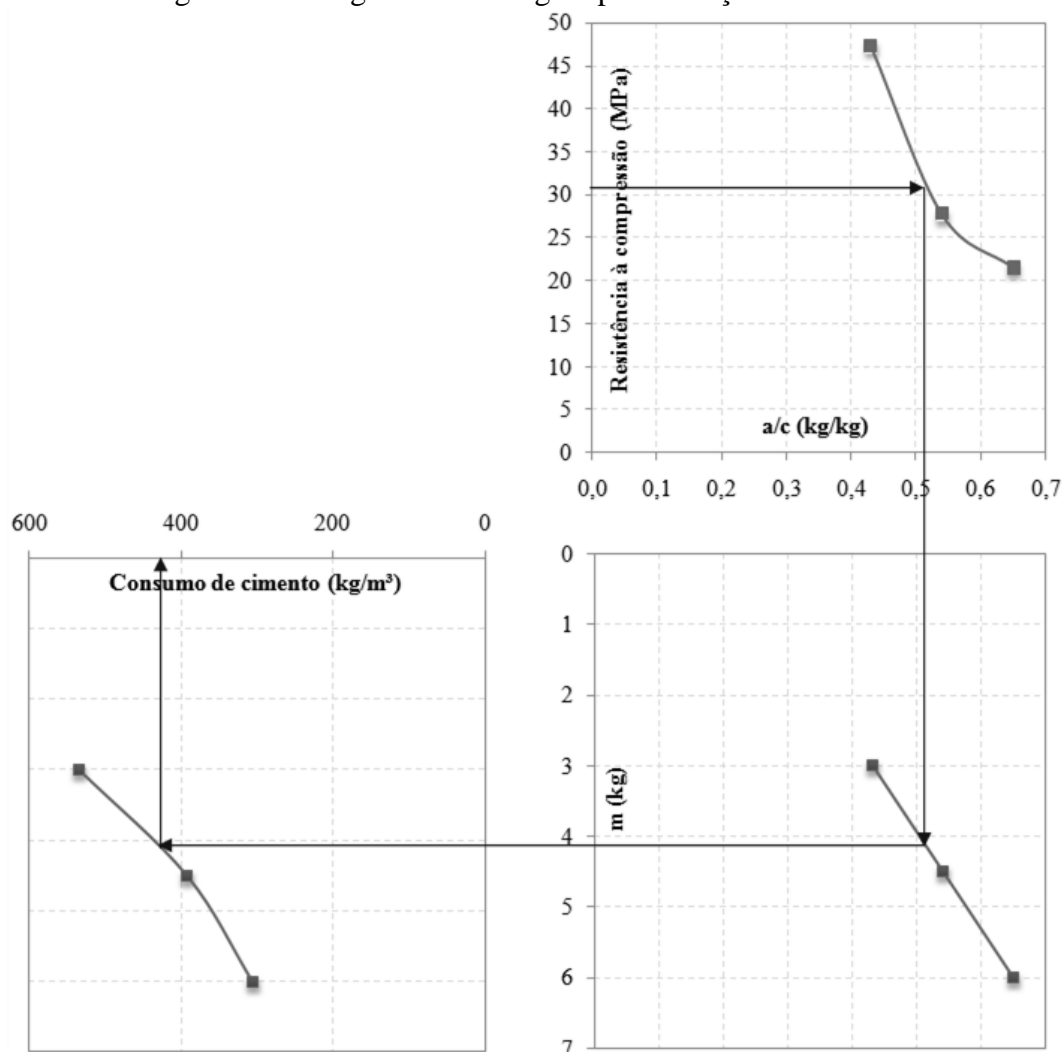
Ensaio de caracterização	Idades (dias)	Referência	Ecológico A	Ecológico B
Resistência à compressão	7	5	5	3
	28	5	5	3
	63	5	5	3
Resistência à tração por compressão diametral	7	5	5	3
	28	5	5	3
	63	5	5	3
Absorção por imersão	34	5	5	3
Absorção por capilaridade	34	5	5	3
Total de corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm)		40	40	24
		104		

Devido à quantidade restrita de materiais, optou-se por moldar apenas 3 corpos de prova em cada idade para o traço Ecológico B, o que não comprometeu as análises realizadas neste trabalho. Cabe ressaltar que os ensaios de resistividade elétrica e ultrassom foram realizados em todos os corpos de prova moldados para os ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral.

3.4.1 Dosagem e produção do concreto de referência

O concreto de referência foi dosado pelo método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), desenvolvendo os traços intermediário (1:4,5), pobre (1:6) e rico (1:3) para a elaboração do diagrama de dosagem. Na Figura 17 está representado o diagrama de dosagem obtido para o traço de referência.

Figura 17 – Diagrama de dosagem para o traço de referência



O índice de consistência foi fixado em 10 ± 1 cm, tendo sido utilizado a brita 1 e a areia industrial, já caracterizados conforme item 3.1.2. O cimento utilizado foi o CPII-F 32, não tendo sido utilizado qualquer adição mineral ou aditivo químico. O teor ótimo de argamassa foi determinado segundo as recomendações do método de dosagem, tendo sido encontrado o valor igual a 53%. A massa específica, no estado fresco, foi de $2,37 \text{ g/cm}^3$ para o traço intermediário, de $2,34 \text{ g/cm}^3$ para o traço pobre e $2,37 \text{ g/cm}^3$ para o rico.

A partir do diagrama de dosagem apresentado na Figura 17, obteve-se o traço do concreto de referência para uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 MPa, que corresponde à resistência de dosagem (f_{cd}) igual a 31,6 MPa, com desvio padrão de 4,0. A relação a/c obtida foi de 0,53, resultando em um consumo de agregados de $4,36 \text{ kg/m}^3$. O traço do concreto de referência está indicado na Tabela 13.

Tabela 13 – Traço do concreto de referência

Materiais	Cimento	Areia	Brita 1	Água
Massa específica (kg/m^3)	3.110	2.620	2.670	1.000
Consumos (kg/m^3)	409,54	753,88	1037,71	217,06
Traço unitário	1	1,84	2,52	0,53

A partir da Tabela 13, observa-se que o concreto de referência segue as recomendações da NBR 12.655 (ABNT, 2015) para uma classe de agressividade II, que caracteriza um ambiente urbano, sendo obedecidos os parâmetros de consumo mínimo de cimento, resistência mínima e fator água/cimento máximo. Pode-se notar, também, que o consumo de cimento alcançado durante a dosagem está um pouco elevado para o tipo de concreto especificado.

A produção do concreto de referência foi executada em laboratório, em betoneira com capacidade de 250 litros, seguindo a ordem de mistura de materiais recomendada por Helene (2005). Esta consiste em misturar inicialmente 80% da água com o agregado graúdo, seguido pelo agregado miúdo, cimento e o restante da água. A mistura ocorreu em sequência com intervalos de 2 minutos entre a adição de cada material, garantindo a completa homogeneização.

Por fim, foram moldados os corpos de prova necessários para os ensaios mecânicos e de durabilidade, resultando em 40 corpos de prova cilíndricos no total (Tabela 12, página 54), todos com dimensões de 10 x 20 cm, moldados em forma metálica e com aplicação de desmoldante. O adensamento do concreto foi realizado manualmente, conforme

recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Por fim, todos os corpos de prova foram submetidos a um regime de cura úmida por 28 dias conforme NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.4.2 Método de dosagem do concreto ecológico

A dosagem de um novo tipo de concreto envolve avaliar diferentes materiais e composições sendo importante garantir propriedades satisfatórias. Para isso, devem ser realizados experimentos, que, além de provarem o desempenho do novo concreto, são necessários para estabelecer parâmetros de dosagem. Esse procedimento pode ser acelerado quando as propriedades dos materiais componentes do concreto são previstas por um método de dosagem baseado no comportamento de cada material. Assim, os modelos de empacotamento podem ser muito úteis para compor misturas otimizadas a partir desses pressupostos (FENNIS, 2011).

Desse modo, Fennis (2011) e Fennis *et al.*, (2013b) propuseram um método de dosagem de concreto ecológico baseado em modelos e conceitos de empacotamento de partículas, tendo enfoque na redução do consumo de cimento. O método proposto é cíclico, tal como se observa na Figura 18.

Figura 18 – Processo cíclico de dosagem de concreto ecológico



(Fonte: adaptado FENNIS, 2011)

O método engloba três etapas: o cálculo da densidade de empacotamento das partículas componentes da mistura, seguida pela determinação da demanda de água e, por fim, a comparação dos resultados previstos pelo modelo com os parâmetros desejados para o concreto. O método se inicia pelo cálculo da densidade de empacotamento das partículas

componentes do concreto. Para isso, é fundamental que os materiais a serem utilizados sejam caracterizados quanto à densidade de empacotamento e distribuição granulométrica. A otimização dos materiais nesta primeira etapa visa melhorar as quantidades de cada um, a fim de reduzir os vazios da mistura. Dessa forma, é conveniente iniciar a dosagem a partir de uma mistura de referência existente, e utilizar o modelo CIPM de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013a) para determinar uma composição com maior densidade de empacotamento, que irá produzir uma mistura mais densa e com menos vazios.

Na segunda etapa, busca-se calcular a quantidade de água necessária, tanto para preencher os vazios entre os grãos, quanto para permitir a fluidez do concreto, como será aprofundado nos itens que segue. Para isso, considera-se o volume relativo de sólidos da mistura (ϕ_{mix}), que é a relação entre o volume parcial de todas as partículas e o volume total ocupado pelo conjunto (sólidos mais água, em uma unidade de volume). Ao aprimorar a densidade de empacotamento na etapa anterior, é possível reduzir a demanda de água e, conseqüentemente, a relação água/cimento, acarretando em uma melhora das propriedades do concreto.

Por fim, a terceira etapa consiste em prever a resistência à compressão do concreto. Para isso, considera-se o espaço existente entre as partículas de cimento e/ou de aglomerantes e o volume de água existente na mistura, de modo a garantir a formação dos produtos de hidratação do cimento. Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b) consideram que o cimento age como uma ponte de ligação entre os agregados, sendo a resistência do concreto dependente do espaço existente para essa conexão. Em misturas com densidade de empacotamento elevada, as partículas estão muito próximas, o que reduz o espaço necessário para ser preenchido com os produtos de hidratação do cimento. Logo, essas misturas apresentarão resistência mecânica mais elevada (BENTZ e AITCIN, 2008).

Tendo sido calculada a resistência à compressão prevista para o concreto, compara-se o valor obtido com a resistência à compressão desejada, que é um requisito inicial à dosagem. Se a resistência prevista resultar em um valor maior que o desejado, podem ser realizados ajustes na composição do concreto, visando a redução da quantidade de cimento.

Fennis (2011) evidencia que ao alterar a quantidade de um material da mistura modifica-se a distribuição das partículas e, conseqüentemente, a densidade de empacotamento. Logo, é necessário repetir o ciclo até que a composição da mistura não seja mais alterada após a última etapa.

Assim, a determinação do traço do concreto ecológico desta pesquisa partiu do traço de referência descrito na Tabela 13 (página 56), buscando manter a mesma resistência à

compressão de dosagem de 31,6 MPa, porém com um consumo de cimento menor. A redução da quantidade de cimento se deu pela alteração do empacotamento tanto dos agregados quanto dos finos. Os traços ecológicos dosados fazem parte dos resultados da presente pesquisa, logo, a descrição de como foi feita a dosagem e os traços obtidos encontram-se no Capítulo 4, de Resultados e Discussões. Na sequência será explicado como proceder com os cálculos em cada etapa do método de dosagem.

a) Densidade de empacotamento

A determinação da densidade de empacotamento real das misturas foi realizada através do modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a), descrito no item 2.2.4, e conforme roteiro apresentado no Apêndice B.

Como o valor do índice de compactação (Tabela 2, página 22), utilizado para os agregados ($K = 4,5$) é inferior ao utilizado para os materiais finos ($K = 12$), adotou-se o maior valor do índice de compactação para todo o conjunto de materiais que compõem o concreto (finos e agregados).

Cada material utilizado para compor o concreto foi considerado como uma classe (n) de grãos, totalizando 6 classes (3 materiais finos e 3 classes para os agregados). A densidade de empacotamento individual de cada classe foi determinada experimentalmente, conforme procedimentos descritos anteriormente, para agregados (item 3.1.2) e finos (item 3.3.1). O diâmetro adotado foi o diâmetro D_{50} , obtido no ensaio de granulometria a laser dos materiais finos (item 3.1.1) e composição granulométrica para agregados (item 3.1.2).

b) Demanda de água

Nessa segunda etapa, o valor da densidade de empacotamento real (ϕ) em uma composição estável (sem a presença de água) deve ser diferenciado do volume relativo de sólidos (ϕ_{mix}) de uma mistura real, em que parte da água é utilizada para preencher os vazios entre as partículas, enquanto o excedente de água produz a fluidez da mistura.

A fluidez do concreto pode ser relacionada ao valor de ϕ_{mix}/ϕ (relação entre o volume relativo de sólidos de uma mistura real e a densidade de empacotamento real do conjunto granular), que representa a quantidade de água relativa presente na mistura. Desse modo, Fennis (2011) correlaciona, na Tabela 14, a consistência desejada do concreto com os valores

alcançados pela relação ϕ_{mix}/ϕ . Os dados são baseados no uso do aditivo Glenium 51 e não se aplicam para concretos auto-adensáveis.

Tabela 14 – Parâmetros de consistência

Consistência desejada		Slump (mm)	$\phi_{mix}/\phi(-)$
C0	Seco	< 30	0,99
C1	Mistura úmida	10-40	0,98
S2	Semi plástico	50-90	0,97
S3	Plástico	100-150	0,95
F4	Muito plástico	> 160	0,93

(Fonte: Adaptado FENNIS, 2011)

Tendo sido determinado o volume relativo de sólidos (ϕ_{mix}) a partir do índice de consistência que se deseja alcançar e da densidade de empacotamento real (determinada pelo modelo CIPM no passo anterior do método), o volume de água do concreto, V_w , em m³, é calculado segundo a Equação (19).

$$V_w = 1 - \phi_{mix} \quad (19)$$

Neste trabalho manteve-se fixo a relação ϕ_{mix}/ϕ igual a 0,95, que corresponde a um concreto plástico com resultado de *slump test* variando entre 100 e 150 mm.

c) Resistência à compressão

Fennis (2011) afirma que há uma influência positiva de altas densidades de empacotamento na resistência mecânica do concreto. Entretanto, este não pode ser o único fator responsável para tal melhora. A autora relata que ao utilizar um filer, com densidade de empacotamento individual maior que a do cimento, por exemplo, a densidade de empacotamento da mistura irá aumentar. Todavia, Fennis (2011) ressalta que essa substituição poderá ocasionar um decréscimo na resistência do concreto ao manter constante ou elevar a quantidade de água, para que tal mistura apresente mesma consistência.

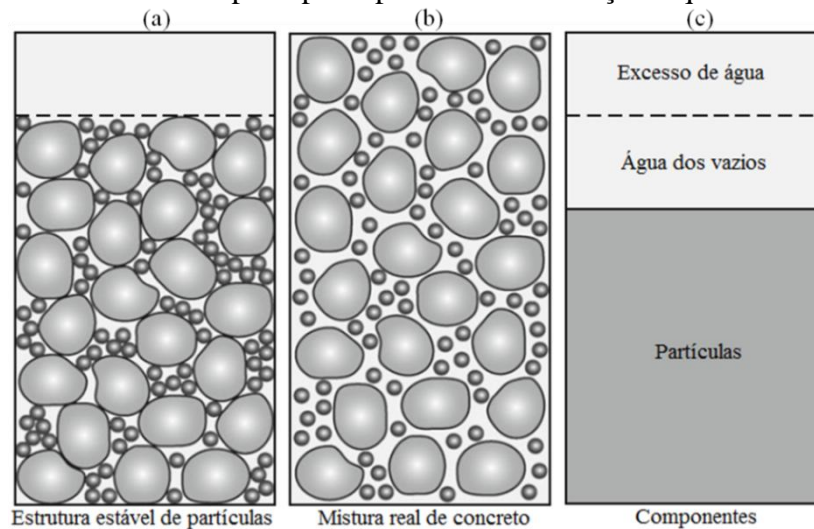
A distância entre as partículas de cimento devem estar relacionadas à resistência do concreto. Com uma quantidade maior de água e relação água/cimento elevada as partículas de cimento estão distantes. Nesse caso, durante o processo de hidratação, os produtos hidratados do cimento necessitam se interligar em uma longa distância o que eventualmente resulta em menores resistências. Com uma densidade de empacotamento maior da mistura, as partículas

de cimento estão mais próximas das outras, fazendo com que o espaço a ser preenchido pelos produtos de hidratação seja menor (BENTZ e AİTCIN, 2008).

Por conseguinte, o método de dosagem de Fennis (FENNIS 2011; FENNIS *et al.*, 2013b) considera um valor que representa a distância entre as partículas de cimento em uma estrutura estável, denotado por $\varphi_{cem}/\varphi_{cem}^*$. Com mais partículas de cimento presentes na mistura o volume parcial de cimento (φ_{cem}) aumenta, aproximando as partículas de cimento. Bem como a presença de filers e uma elevada densidade de empacotamento do conjunto faz com que o volume máximo que pode ser ocupado pelo cimento (φ_{cem}^*) diminua, também aproximando as partículas.

Essa situação pode ser observada em uma estrutura estável, em que as partículas estão em contato umas com as outras, de forma que o empacotamento da estrutura é estável sob influência da gravidade, sendo as partículas submetidas a uma densidade de empacotamento real (ϕ), tal como mostrado na Figura 19 (a). Essa situação difere de uma mistura real de concreto, Figura 19 (b) e (c), em que parte da água é utilizada para preencher os vazios entre as partículas e o excedente de água proporciona a fluidez da mistura. Portanto, o espaço disponível para as partículas de aglomerante aumenta ou diminui dependendo da quantidade de água adicionada, sendo necessário considerá-la para a previsão da resistência do concreto.

Figura 19 – Volume ocupado pelas partículas em relação à quantidade de água



(Fonte: adaptado FENNIS, 2011)

A partir deste conceito, o volume parcial ocupado pelo cimento (φ_{cem}) considerando uma estrutura estável de partículas pode ser calculado através da Equação (20).

$$\varphi_{cem} = \gamma_c \cdot \phi \quad (20)$$

Em que: φ_{cem} é o volume parcial ocupado pelo cimento em uma estrutura de partículas estáveis (-); y_c é o volume da fração de cimento na mistura (-); ϕ é a densidade de empacotamento real (-).

Já para determinar o valor teórico correspondente ao volume máximo que o cimento pode ocupar devido à presença de outras partículas (φ^*_{cem}) é necessário estabelecer a parcela de contribuição do cimento para o valor total do índice de compactação (K). Com os resultados obtidos pelo CIPM e aplicando a Equação (21), é possível calcular o valor de φ^*_{cem} pela Equação (22)

$$K_{cem} = \sum_{i=1}^n \frac{y_c / \beta_c}{1/\phi - 1/\gamma_c} \quad (21)$$

$$\varphi^*_{cem} = \varphi_{cem} \cdot \frac{1 + K_{cem}}{K_{cem}} \quad (22)$$

Em que: β_c é densidade de empacotamento do cimento (-); K_{cem} é contribuição do cimento para o índice de compactação K (-); γ_c é densidade de empacotamento virtual para a classe de cimento (-); y_c é o volume relativo do cimento (-); φ_{cem} é o volume parcial ocupado pelo cimento em uma estrutura de partículas estáveis (-); φ^*_{cem} é o volume máximo que o cimento pode ocupar devido às outras partículas (-); ϕ é densidade de empacotamento real (-).

Desse modo, é possível estabelecer um fator de espaçamento do cimento *CSF* (do inglês *Cement Space Factor*), o qual está relacionado à resistência do concreto e pode ser calculado pela Equação (23) (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013b)

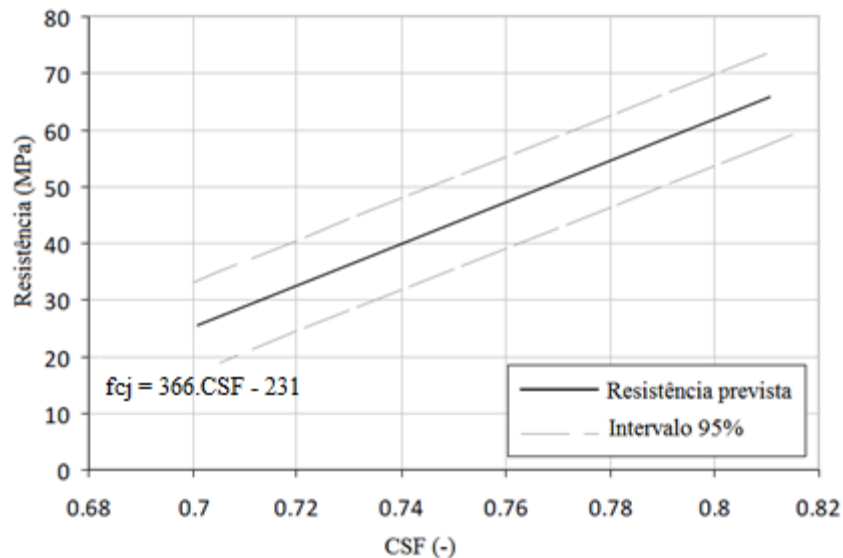
$$CSF = \frac{\varphi_{cem}}{\varphi^*_{cem}} \cdot \frac{\varphi_{mix}}{\phi} \quad (23)$$

Valores elevados de *CSF* representam um espaço pequeno entre partículas e, consequentemente, uma resistência maior. Esse fator está relacionado à quantidade de água da mistura, de modo que ao aumentar a quantidade de água, o espaçamento entre as partículas se eleva, reduzindo o valor de *CSF* e a resistência à compressão do concreto.

Fennis (2011) fixa um limite inferior para o fator *CSF* de 0,70, correspondente a uma resistência mínima de 25 MPa, aos 28 dias, e um limite superior para o fator, na ordem de 0,80 que se aproxima de 65 MPa, aos 28 dias. Esta relação é demonstrada no gráfico da Figura 20. Este foi determinado através de resultados experimentais realizados pela autora em

diversas misturas de concreto, utilizando cimento Portland do tipo I para duas classes de resistência (CEM I 32.5 R e CEM I 42.5 N), correlacionando o valor de *CSF* com a resistência à compressão alcançada.

Figura 20 – Relação experimental entre *CSF* e resistência à compressão do concreto aos 28 dias



(Fonte: Adaptado FENNIS, 2011)

Por meio da Figura 20, pode-se então prever a resistência à compressão do concreto. Quando a resistência prevista for maior do que a requisitada, pode-se aumentar a quantidade de água ou reduzir o consumo de cimento, através da sua substituição por um filer ou ainda por materiais com propriedades aglomerantes como as pozolanas, por exemplo. Nesse caso, a utilização de uma pozolana deve ser considerada nos cálculos do espaçamento entre partículas para estimativa da resistência e as Equações (20), (21) e (22) devem ser substituídas pelas Equações (24), (25) e (26), respectivamente. O valor de K_a , o que representa a contribuição da adição para o índice de compactação K , exposto na Equação (25) deve ser calculado da mesma forma que K_{cem} , conforme Equação (21).

$$\varphi_b = y_c \cdot \phi + 0,4y_a \cdot \phi \quad (24)$$

$$K_b = 1,0K_{cem} + 0,4K_a \quad (25)$$

$$\varphi * _b = \varphi_b \cdot \frac{1+K_b}{K_b} \quad (26)$$

Em que: φ_b é o volume parcial ocupado pelo aglomerante em uma estrutura de partículas estáveis (-); φ_b^* é o volume máximo que o aglomerante pode ocupar devido às outras partículas (-); y_c é o volume relativo do cimento (-); y_a é o volume relativo da adição (-); ϕ é densidade de empacotamento real (-); K_{cem} é contribuição do cimento para o índice de compactação K (-); K_a é contribuição da adição para o índice de compactação K (-); K_b é a contribuição do aglomerante para o índice de compactação K (-);

Após a finalização do processo cíclico de dosagem, este ciclo se repete a cada novo ajuste da composição da mistura, até que se atinjam as especificações requisitadas para o concreto (no presente estudo, o requisito é a resistência à compressão). Cabe salientar ainda que, se desejado, podem ser fixados alguns parâmetros de dosagem como uma quantidade mínima de cimento ou finos, relação água/cimento, entre outros. Entretanto, isso pode provocar alterações no empacotamento dos materiais, sendo necessário realizar ajustes até se obter a composição e os parâmetros desejados.

Um exemplo de aplicação do ciclo de dosagem proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b) encontra-se descrito no Apêndice E deste trabalho.

Os traços ecológicos dosados fazem parte dos resultados da presente pesquisa, logo, a descrição de como foi feita a dosagem e os traços obtidos encontram-se no Capítulo 4, de Resultados e Discussões.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E ESTUDOS COMPLEMENTARES

Para a caracterização dos concretos produzidos foram realizados ensaios tanto no estado fresco como no estado endurecido, para o traço de referência e os concretos ecológicos.

3.5.1 Ensaio em estado fresco

A consistência dos concretos estudados foi avaliada através do ensaio de abatimento do tronco de cone conforme especificações da NBR NM 67 (ABNT, 1998). Para isso, foi fixado um abatimento no intervalo de 10 a 15 cm, referente a um concreto de consistência plástica, conforme descrito na Tabela 14 (página 60). Foram realizados ajustes de água para se obter a consistência desejada.

Foi executado ainda o ensaio de massa específica do concreto fresco, segundo a NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.5.2 Ensaaios mecânicos

Com o intuito de caracterizar os concretos produzidos, foram executados os seguintes ensaios do concreto em estado endurecido:

- Resistência à compressão, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011).

O ensaio de compressão axial foi realizado com a utilização de neoprene para regularização das bases dos corpos de prova e aplicação uniforme da carga. O ensaio foi realizado em prensa EMIC com capacidade total de carga de 200 tf.

A quantidade de corpos de prova escolhida para a realização dos ensaios mecânicos, descrita previamente na Tabela 12, visou atender uma quantidade de amostras que permita análises estatísticas confiáveis através do método ANOVA (RIBEIRO e CATEN, 2003), a fim de se obter resultados com baixo desvio padrão.

Verificou-se também a massa específica do concreto em estado endurecido, determinada nas mesmas idades de ensaio de resistência à compressão, medindo a massa e o volume dos corpos de prova, sendo o volume obtido pela mensuração das dimensões com paquímetro, em condição saturada com superfície seca.

3.5.3 Ensaaios de durabilidade

Os ensaios de durabilidade dos concretos em estudo buscaram atender, de forma geral, características de porosidade do material, a qual consiste no fator determinante para a atuação dos mecanismos de degradação. Os ensaios realizados são descritos a continuação.

a) Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme requisitos da NBR 9778 (ABNT, 1987). A ausência de equipamentos em laboratório impossibilitou realizar o ensaio de acordo com a nova norma, publicada em 2005. Logo, optou-se por realizar o ensaio conforme norma antiga, de 1987. A absorção de água e o índice de vazios foram calculados através das Equações (27) e (28) propostas pela NBR 9778 (ABNT, 1987).

$$A_i = 100 \cdot \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (27)$$

$$E_v = 100 \cdot \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (28)$$

Em que: A_i é a absorção de água por imersão (%); M_{sat} é a massa do corpo de prova saturado (g); M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa (g); M_i é a massa do corpo de prova imerso em água (g); E_v é o índice de vazios do concreto (%).

Os corpos de prova foram submetidos à cura úmida por 28 dias, e em seguida foram dispostos em estufa com temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante três dias para estabilização e constância de massa, sendo assim, o ensaio iniciou com os corpos de prova na idade de 31 dias.

b) Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme requisitos da NBR 9779 (ABNT, 1995). A ausência de equipamentos em laboratório impossibilitou realizar o ensaio de acordo com a nova norma, publicada em 2005. Logo, optou-se por realizar o ensaio conforme norma antiga, de 1995. A absorção de água por capilaridade foi calculada através da Equação (29) proposta pela NBR 9778 (ABNT, 1987).

$$A_c = \frac{M_c - M_s}{S} \quad (29)$$

Em que: A_c é a absorção de água por capilaridade (g/cm^2); M_c é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água (g); M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa (g); S é a área da seção transversal do corpo de prova (cm^2).

Os corpos de prova foram submetidos à cura úmida por 28 dias, e em seguida foram dispostos em estufa com temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante três dias para estabilização e constância de massa, sendo assim, o ensaio iniciou com os corpos de prova na idade de 31 dias.

c) Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ondas de ultrassom

A resistividade elétrica dos concretos foi mensurada pelo equipamento RESIPOD - PROCEQ AS e conforme recomendações propostas por Polder (2001).

Para a determinação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, utilizou-se o equipamento Pundit PL-200, da Proceq. O procedimento foi adotado conforme as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2013) e empregou-se a transmissão direta entre os transdutores, com frequência de onda de 54 kHz e propagação de onda a cada 9,3 μ s.

Para ambos os ensaios, utilizou-se os mesmos corpos de prova moldados para os ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral. Isso é possível, pois a mensuração da resistividade elétrica e da velocidade de propagação de ondas de ultrassom consiste em procedimentos não destrutivos. Durante o período de cura, foram realizadas leituras de resistividade elétrica e ultrassom dos corpos de prova nas idades de 7, 14, 28, e 63 dias.

Através do ensaio com ultrassom foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto para cada idade de ensaio, pela Equação (16) previamente apresentada no item 2.3.2. O coeficiente de Poisson adotado para o concreto foi de 0,2, conforme recomendações da norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.5.4 Análise de custos

Para avaliar a viabilidade econômica da produção do concreto ecológico dosado, realizou-se uma análise de custo, comparando os custos dos três concretos produzidos. A avaliação se restringiu ao custo dos materiais, considerando que não seriam necessárias alterações de custos de mão de obra e equipamentos.

Inicialmente obteve-se o custo unitário dos materiais utilizados, para posterior cálculo dos custos por m³ de cada traço. Os valores unitários foram colhidos na região de Curitiba/PR, no terceiro trimestre de 2015. Calculou-se também o custo relativo dos concretos em R\$/m³.MPa, considerando os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios e análises que compõem o programa experimental do presente trabalho. Além disso, foram propostas discussões que visam identificar e justificar os fenômenos observados, realizando, também, comparações com dados existentes na literatura.

4.1 ESTUDO DE AGREGADOS

4.1.1 Avaliação analítica para otimização dos agregados

a) Areia normal do IPT

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela realização do estudo analítico de otimização dos agregados, em que foram estudados os modelos de empacotamento de partículas propostos por Füller e Thompson, Andreasen e Andersen, ambos descritos por Fennis (2011), e Funk e Dinger (1980). O estudo foi realizado com a areia normal brasileira fornecida pelo IPT, e buscou-se determinar qual dos modelos utilizados produz uma curva granulométrica com o menor índice de vazios. Após este estudo com a areia normal do IPT, o modelo de empacotamento que apresentou os melhores resultados foi empregado para otimizar a curva granulométrica dos agregados utilizados na dosagem do concreto ecológico (brita 1, brita 0 e areia).

Os resultados obtidos para as combinações volumétricas de agregados referentes a cada uma das 4 classes da areia normal brasileira, calculados segundo os modelos de empacotamento de partículas são dados na Tabela 15. Considerou-se, também, para efeito de referência, a curva granulométrica média, entre os limites da zona ótima estabelecida pela ABNT NBR 7211 (2009).

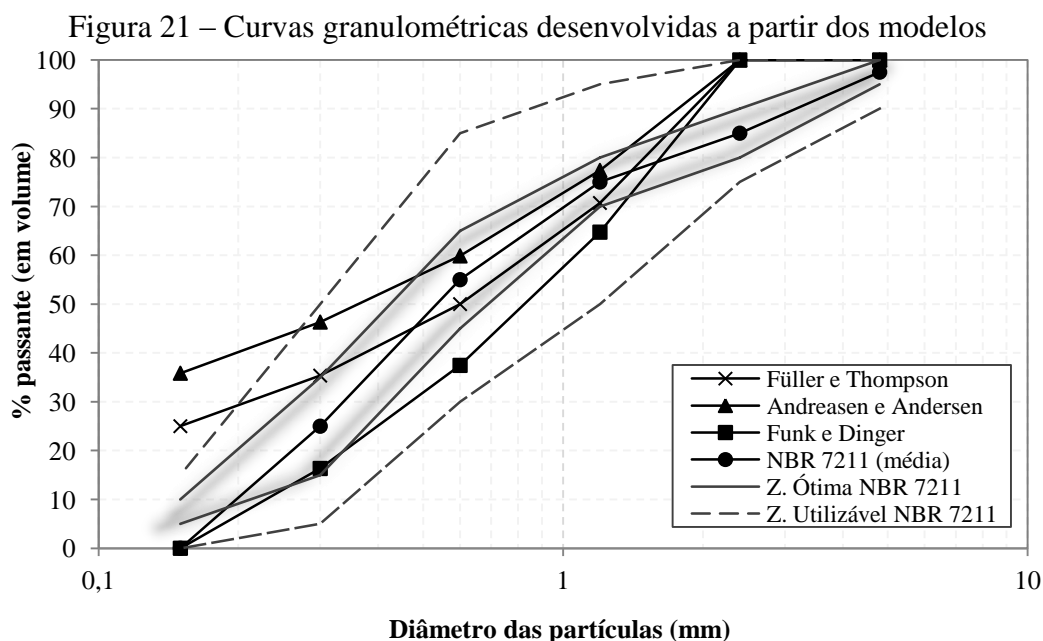
Ressalta-se que os modelos de Füller e Thompson e Andreasen e Andersen admitem partículas infinitamente pequenas, pois não consideram a existência de um diâmetro mínimo. Este fato difere da realidade dos conjuntos granulares. Dessa forma, ao aplicarem-se estes modelos para obtenção de uma curva granulométrica ideal, observa-se que a soma das porcentagens correspondentes a cada classe da areia não totaliza 100%. Este é um requisito indispensável ao uso do modelo analítico CPM (De Larrard, 1999) para o cálculo da densidade de empacotamento. Dessa forma, optou-se por realizar a normalização dos

resultados para ambos os modelos. Para isso dividiu-se os valores percentuais de cada fração pela soma total atingida (resultados entre parênteses na Tabela 15.). Isso possibilitou o cálculo da densidade de empacotamento, através do modelo CPM (De Larrard, 1999).

Tabela 15 - Combinações volumétricas obtidas e densidade de empacotamento dos modelos de otimização

Conjunto granular	Volume de cada fração (%)				Total (%)
	1,2 mm	0,6 mm	0,3 mm	0,15 mm	
Modelo: Füller e Thompson	29,29 (38,04)	20,71 (26,90)	16,64 (21,61)	10,36 (13,45)	77,0 (100,0)
Modelo: Andreasen e Andersen	22,62 (35,26)	17,50 (27,29)	13,54 (21,11)	10,48 (16,34)	64,15 (100,0)
Modelo: Funk e Dinger	35,26	27,29	21,11	16,34	100,0
Média da zona ótima da norma NBR 7211 (2009)	25,0	20,0	30,0	25,0	100,0

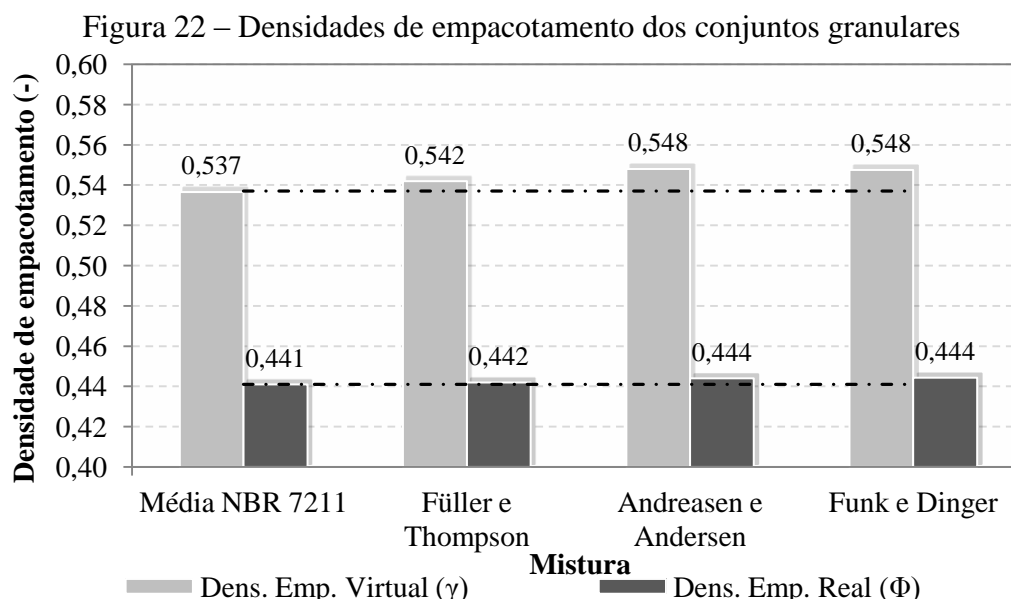
A Figura 21 apresenta as curvas granulométricas obtidas a partir das porcentagens volumétricas calculadas pelos modelos de empacotamento de partículas, dadas na Tabela 15.



A partir da Figura 21, observa-se que as curvas granulométricas referentes aos modelos de Füller e Thompson e Andreasen e Andersen apresentam comportamento semelhante, pois ambas não alcançam o valor de ordenada zero, devido à não consideração de um diâmetro mínimo, conforme já apresentado na Equação (1). Observa-se que a primeira curva, de Füller e Thompson, é mais próxima da curva de referência proposta pela norma NBR 7211 (ABNT,

2009). Já a curva de Funk e Dinger se distancia da zona ótima proposta pela mesma norma, passando à zona utilizável inferior

Com as porcentagens volumétricas referentes a cada classe de tamanho de grãos, aplicou-se o modelo analítico CPM (De Larrard, 1999) para se obter a densidade de empacotamento de cada uma das curvas granulométricas elaboradas a partir dos modelos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 22.



A curva granulométrica obtida pelo modelo de Füller e Thompson, em que se fez a normalização dos dados, foi a que apresentou mais similaridade com a curva de referência, da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), resultando em densidades de empacotamento virtual e real 0,9% e 0,2% superior à curva de referência, respectivamente. Já a curva granulométrica estabelecida através do modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1980) apresentou densidades de empacotamento virtual e real 2,0% e 0,7% superior aos valores obtidos pela curva de referência da norma, respectivamente. A curva normalizada determinada pelo modelo de Andreasen e Andersen apresentou os mesmos resultados da curva de Funk e Dinger (1980). Isso ocorreu, pois ao aplicar a técnica de normalização elimina-se a possibilidade de haver grãos infinitamente pequenos, o que é semelhante a considerar um tamanho mínimo de grãos. Este último conceito foi implementado por Funk e Dinger (1980) ao desenvolverem seu modelo.

Essas pequenas variações encontradas entre os resultados obtidos para os modelos, assim como os baixos valores de densidades de empacotamento encontrados, pode responder ao fato de que a areia normal do IPT conta com o uso de apenas 4 classes de tamanho de

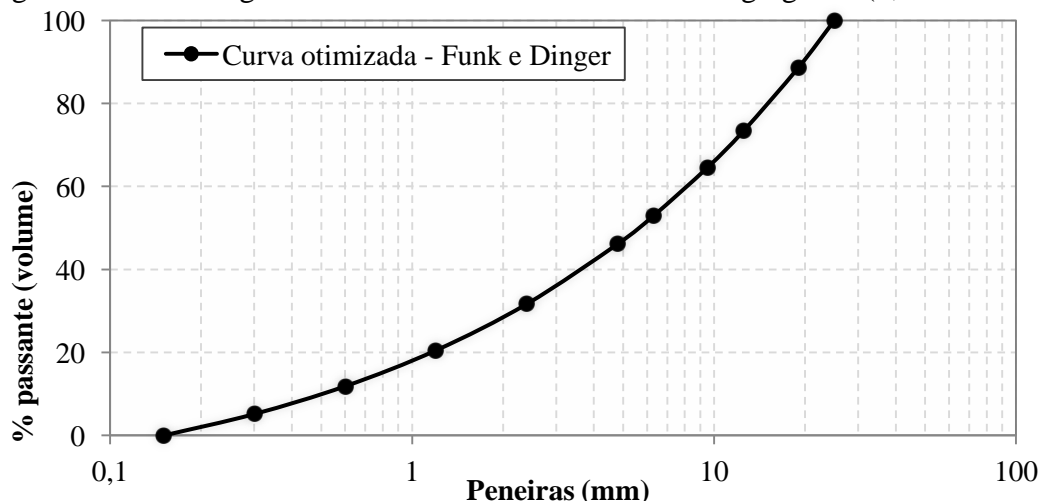
grãos, dando uma amplitude pequena às curvas granulométricas desenvolvidas, de 0,15 mm a 1,2 mm. Porém, a norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009) considera a existência de 6 classes de grãos para a areia, as quais não foram todas consideradas devido à areia normal do IPT não dispor de outras frações.

Os modelos de empacotamento de partículas que resultam em uma curva granulométrica ideal, como o de Funk e Dinger (1980), devem ser usados considerando todo o esqueleto granular que será aplicado nos concretos, o que inclui as classes de tamanhos de grãos referentes à areia e à brita. Esse fato colabora ainda mais para aumentar a amplitude de tamanhos de grãos presentes nos conjuntos granulares. Uma mistura que dispõe de um maior número de classes pode apresentar um melhor preenchimento dos vazios, uma vez que há mais variedade de tamanhos de grãos, conforme já apontado por outros autores como Silva *et al.* (2003) e Fennis (2011). De qualquer forma, são necessários estudos futuros que relacionem a quantidade de classes com a densidade de empacotamento para quantificar tal efetividade.

b) Agregados para produção dos concretos

Como o modelo de Funk e Dinger (1980) apresentou a máxima densidade de empacotamento, optou-se por adotá-lo para otimizar os agregados que foram utilizados na dosagem do concreto ecológico. Para isso, considerou-se inicialmente as 10 classes de agregados compostas pela brita 1, brita 0 e areia (Tabela 8, página 47) como segue na Figura 23.

Figura 23 – Curvas granulométricas com as 10 classes de agregados (0,15 – 19 mm)



Ao aplicar o modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a) para o cálculo da densidade de empacotamento, a curva elaborada a partir do modelo de Funk e Dinger (1980) resultou em uma densidade de empacotamento real de 0,682.

Não obstante, a utilização dessa curva otimizada para a dosagem do concreto implica na necessidade de peneirar os agregados para separá-los nas frações que compõem a curva. Esse procedimento, além de demandar tempo, requer uma grande quantidade de material, o que torna o processo inviável. Por isso, realizou-se uma análise para buscar a proporção entre os três agregados que apresente densidade de empacotamento próximo à da curva com as 10 classes, otimizada pelo modelo de Funk e Dinger (1980).

A Tabela 16 demonstra um resumo das variações realizadas e a densidade de empacotamento real obtida. Cabe salientar que a proporção entre as britas foi determinada experimentalmente, segundo procedimento descrito no item 3.2.2., (resultados apresentados na Figura 25, mais adiante), sendo essa proporção mantida constante. Pode-se notar este fato pela razão entre o volume de brita 0 e brita 1 (indicados na Tabela 16), que resulta sempre em 1,5, o qual corresponde a 60% de brita 0 e 40% de brita 1.

Tabela 16 – Variações na proporção de agregados e densidade de empacotamento

Material	D ₅₀ (mm)	Proporções (% em volume)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Brita 1	19	16	18	20	22	22,4	22,8	23,2	24	26	28
Brita 0	4,8	24	27	30	33	33,6	34,2	34,8	26	39	42
Areia	0,6	60	55	50	45	44	43	42	40	35	30
Brita 0/ Brita 1		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
ϕ (K=4,5)		0,638	0,652	0,666	0,678	0,681	0,684	0,686	0,689	0,697	0,695
Vazios (-)		0,362	0,348	0,334	0,322	0,313	0,316	0,314	0,311	0,303	0,305

Conforme Tabela 16 constata-se que a proporção que mais se aproxima da curva granulométrica elaborada com o modelo de Funk e Dinger (1980) é a proporção número 5. Esta, composta por 22,4% de brita 1, 33,6% de brita 0 e 44% de areia, resultou em uma densidade de empacotamento de 0,681, muito próxima da curva obtida pelo uso do modelo, com as 10 classes do agregado, que apresentou densidade de empacotamento real de 0,682.

É interessante notar, no entanto, que a máxima densidade empacotamento obtida é igual a 0,697, alcançada pela proporção número 9. Este valor, obtido ao se considerar cada agregado como uma classe de tamanho de grãos (totalizando 3 classes) é superior a densidade de empacotamento alcançada pela curva proveniente do modelo de Funk e Dinger, que considera as 10 classes do agregado. Ressalta-se que as composições com 3 classes (cada

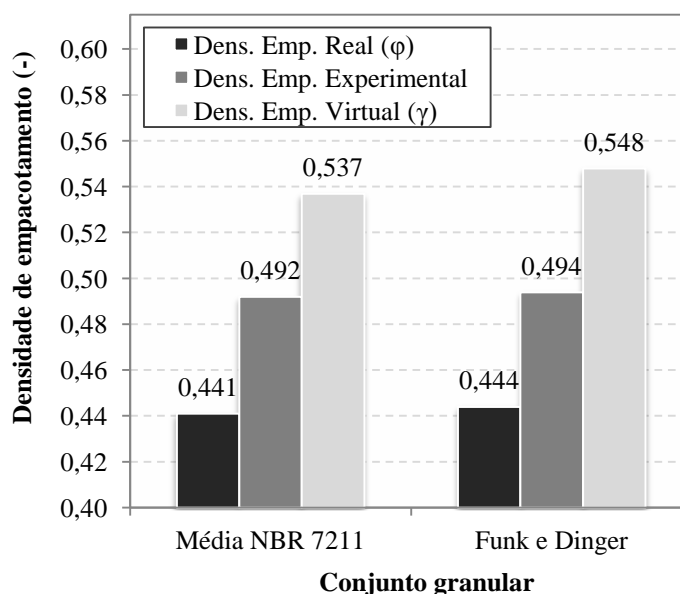
agregado representando uma classe de grãos) foram determinadas aleatoriamente. Estas composições podem produzir densidades de empacotamento elevadas, entretanto, não seguem um modelo específico. Isso limita o seu uso a processos empíricos de tentativa e erro, dificultando sua aplicação. Por fim, o cálculo da densidade de empacotamento feito ao considerar-se cada agregado como uma classe única de tamanho de grãos está passível de erros, pois a variação de tamanho de grãos em cada agregado é bastante grande. Ou seja, representa-se uma amplitude grande de tamanho de grãos por um único diâmetro. Por essa razão, a verificação experimental destes resultados teóricos é de grande importância para validação da prática realizada.

4.1.2 Avaliação experimental para otimização dos agregados

a) Areia normal do IPT

As curvas granulométricas obtidas pelas composições com a areia normal do IPT, e pelas combinações dos agregados utilizados na produção do concreto ecológico, foram reproduzidas em laboratório. Na Figura 24 são apresentados os resultados de densidade de empacotamento determinados experimentalmente, em comparação aos resultados teóricos de densidade de empacotamento virtual e real, calculada pelo modelo CPM (De Larrard, 1999), para as composições elaboradas com a areia normal do IPT.

Figura 24 – Verificação experimental dos resultados teóricos para os conjuntos granulares produzidos com a areia normal do IPT



Como a densidade de empacotamento real é calculada utilizando o índice de compactação K , correspondente ao método de compactação utilizado na determinação experimental, a comparação destes resultados experimentais deve ser realizada com os valores de densidade de empacotamento real. A comparação de dados experimentais não pode ser feita com a densidade de empacotamento virtual, pois esta não considera os efeitos de compactação que existem na prática. Ressalta-se que, para a areia normal do IPT, foram reproduzidos experimentalmente os dois conjuntos granulares: a curva da média dos valores recomendados para a zona ótima da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), tido como referência, e o conjunto granular dado pelo modelo de Funk e Dinger (1980), o qual apresentou a máxima densidade de empacotamento.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 24, percebe-se que densidade de empacotamento experimental é 11,6% e 11,3% superior à densidade de empacotamento real teórica, para os casos da curva média da norma brasileira e da curva do modelo Funk e Dinger, respectivamente. É natural que uma pequena diferença entre os resultados experimentais e teóricos sejam encontrados, pois os modelos são elaborados, muitas vezes, a partir de simplificações e de dados experimentais de um determinado conjunto de materiais. Ao se usar outros materiais nas campanhas experimentais, então, diferenças podem ser observadas. Ressalta-se, novamente, que não é adequada a comparação dos dados experimentais com os dados teóricos de densidade de empacotamento virtual, pois esta última não considera a compactação aplicada ao conjunto. Na realidade, a densidade de empacotamento virtual considera que cada uma das partículas foi posicionada uma a uma, de modo que o preenchimento do espaço é mais efetivo. Por isso, seu valor é superior aos resultados experimentais e à densidade de empacotamento real. Entretanto, essa condição não representa a realidade das misturas granulares.

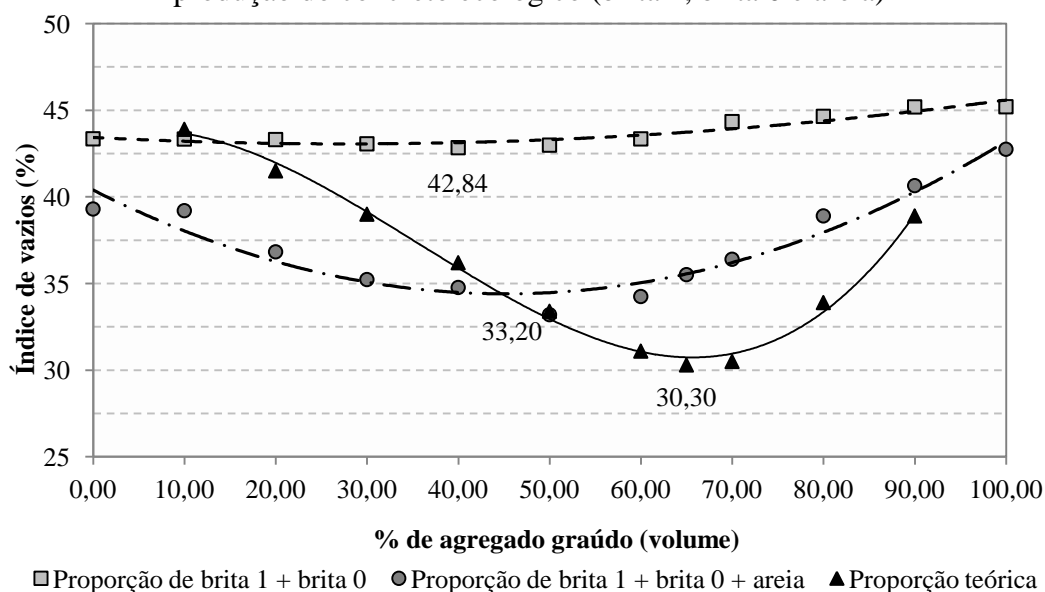
Comparações similares à apresentada neste estudo, entre resultados experimentais e teóricos (densidade de empacotamento real), são encontradas na literatura (DE LARRARD, 1999; FENNIS *et al.*, 2013a) para 2 classes de grãos. Em todos os casos avaliados pelos autores, a densidade de empacotamento experimental se mostrou maior que os valores obtidos analiticamente, com variações na ordem de 2%. A ordem de variação apresentada neste trabalho é superior, podendo-se justificar o fato pelo uso de materiais com características diferentes das usadas pelos autores. De qualquer modo, ambos os autores citados relatam que mesmo com as divergências, o modelo CPM (DE LARRARD, 1999) é passível de utilização.

Finalmente, observa-se que as densidades de empacotamento experimentais são muito próximas umas das outras. Estes valores são iguais a 0,492 e 0,494 para os casos da curva média da norma brasileira e da curva do modelo Funk e Dinger (1980), respectivamente. Isto significa que a densidades de empacotamento experimental obtida pelo modelo Funk e Dinger (1980) é apenas 0,5% superior à obtida pela curva média da norma brasileira. Ou seja, a diferença entre os resultados experimentais é menor que a observada entre os resultados teóricos de densidade de empacotamento real.

b) Agregados para produção dos concretos

Dando continuidade ao estudo, buscou-se determinar experimentalmente a proporção com menor índice de vazios entre os três agregados (brita 1, brita 0 e areia) utilizados para a dosagem do concreto ecológico. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 25, juntamente com os resultados teóricos previamente apresentados na Tabela 16 (página 72). O eixo horizontal do gráfico indica a variação da fração mais grossa que, para o caso das curvas da proporção dos três agregados e da proporção teórica representa o conjunto de britas, e para a curva da proporção das britas a fração mais grossa da composição é representada pela brita 1.

Figura 25 – Índice de vazios obtidos para as combinações dos agregados utilizados na produção do concreto ecológico (brita 1, brita 0 e areia)



Através dos resultados apresentados na Figura 25 observa-se que a proporção ótima entre os agregados graúdos é de 40% de brita 1 e 60% de brita 0, apresentando um índice de

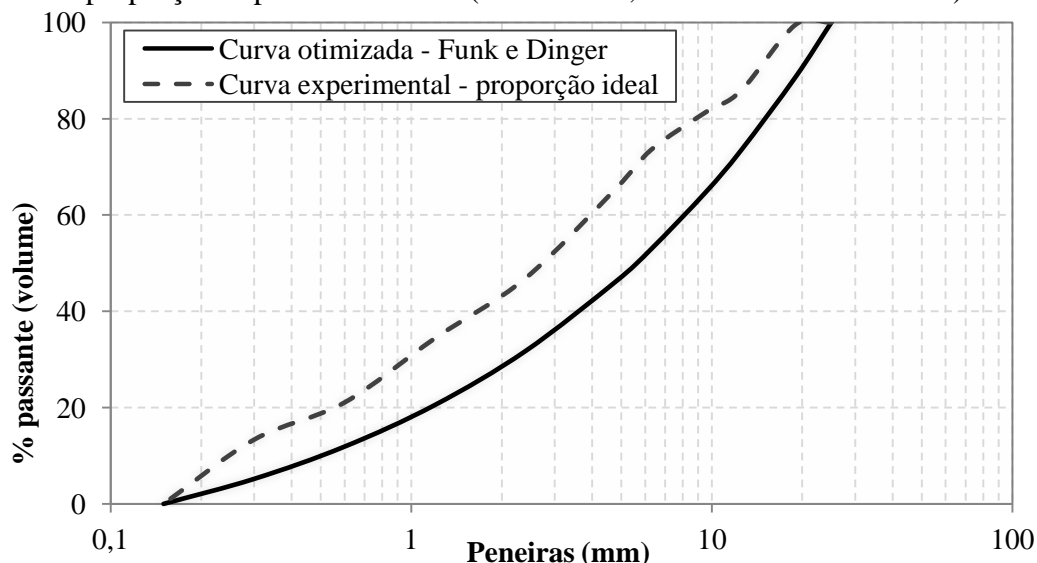
vazios mínimo de 42,8%. Ao acrescentar a areia na mistura das britas, mantendo a relação entre estas constante e igual à proporção ideal encontrada (40% de brita 1 e 60% de brita 0), obteve-se uma redução de 22% no índice de vazios, cujo valor mínimo resultou em 33,2%. Assim a proporção ideal alcançada para os três materiais foi de 50% de areia e 50% de agregado graúdo, o qual corresponde a 20% de brita 1 (equivalente a 40% do agregado graúdo) e 30% de brita 0 (equivalente a 60% do agregado graúdo).

A partir do índice de vazios, calculou-se a densidade de empacotamento experimental da mistura otimizada, dada pela Equação (3) previamente apresentada no item 2.2.3, a qual resultou em 0,668. Observa-se que este valor é muito próximo do resultado analítico obtido pelo modelo CIPM (proporção 3, Tabela 16, página 72) que foi de 0,666. Assim, a densidade de empacotamento experimental se mostrou superior à analítica em 0,3%, demonstrando que o modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a) apresenta boa correlação com resultados experimentais. Porém, essa boa correlação entre resultados experimentais e teóricos foi verificada apenas para esta mistura estudada. Na Figura 25, observa que esta mistura está muito próxima do ponto de intersecção entre as curvas experimental e teórica. Nos demais pontos das curvas (outras misturas estudadas), a aproximação de resultados não acontece e estas duas curvas voltam a se distanciar. Este fato pode demonstrar que a escolha de representar um conjunto de agregados por um único diâmetro não é adequada para a previsão da densidade de empacotamento pelo modelo CIPM.

Como consequência das diferenças observadas entre os resultados experimentais e teóricos, verifica-se que a proporção experimental ideal entre os três agregados (20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia) não foi considerada a melhor combinação de agregados pelo modelo analítico CIPM, o qual indicou a proporção com 26% de brita 1, 39% de brita 0 e 35% de areia como ideal (proporção 9 da Tabela 16). Pelos cálculos conforme o modelo, a primeira mistura apresentou densidade de empacotamento real de 0,666, sendo este valor 4,6% inferior à densidade de empacotamento da segunda mistura, que resultou em 0,697, e índice de vazios de 30,3% (Tabela 16).

Outra análise realizada foi a comparação entre a curva elaborada pelo modelo de Funk e Dinger (1980) e uma curva composta pela proporção experimental ideal, obtida entre os agregados (20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia). Essa última foi elaborada considerando as dez frações de agregados (Tabela 8, página 47) e as porcentagens retidas em cada fração conforme ensaio de composição granulométrica dos agregados (Tabela 6, página 43). Na Figura 26 estão representadas tais curvas.

Figura 26 – Curvas granulométricas elaboradas pelo modelo de Funk e Dinger e através da proporção experimental ideal (20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia)



É possível verificar na Figura 26 que ambas as curvas apresentaram um comportamento contínuo, indicando boa distribuição dos grãos. Ao aplicar o modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a) para o cálculo da densidade de empacotamento de cada curva constatou-se que a curva do modelo Funk e Dinger (1980) atingiu um empacotamento real de 0,682, como citado anteriormente. A curva elaborada a partir das proporções experimentais resultou em uma densidade de empacotamento igual a 0,673, 1,3% inferior à curva do modelo.

Isso demonstra a possibilidade de aplicação do modelo de Funk e Dinger (1980) para reduzir a quantidade de vazios obtendo uma curva contínua com densidade de empacotamento próxima à obtida experimentalmente. Essas curvas apresentam grande amplitude de tamanho de grãos, desde 0,150 mm a 19 mm, e frações pequenas em quantidade suficiente para preencher os espaços entre as partículas maiores, diminuindo o volume de vazios e resultando, assim, em uma densidade de empacotamento mais elevada. Este efeito de preenchimento, conhecido como efeito *filler*, resulta na diminuição da porosidade de um conjunto granular, aumentando a sua densidade de empacotamento (ALEXANDER e MINDESS, 2005; KWAN *et al.*, 2013).

Desse modo, optou-se iniciar a dosagem do concreto ecológico partindo da combinação de agregados experimental que apresentou maior densidade de empacotamento. Ou seja, a proporção de 20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia. Porém, a escolha definitiva da proporção de agregados a ser utilizada na produção do concreto ecológico será realizada em conjunto

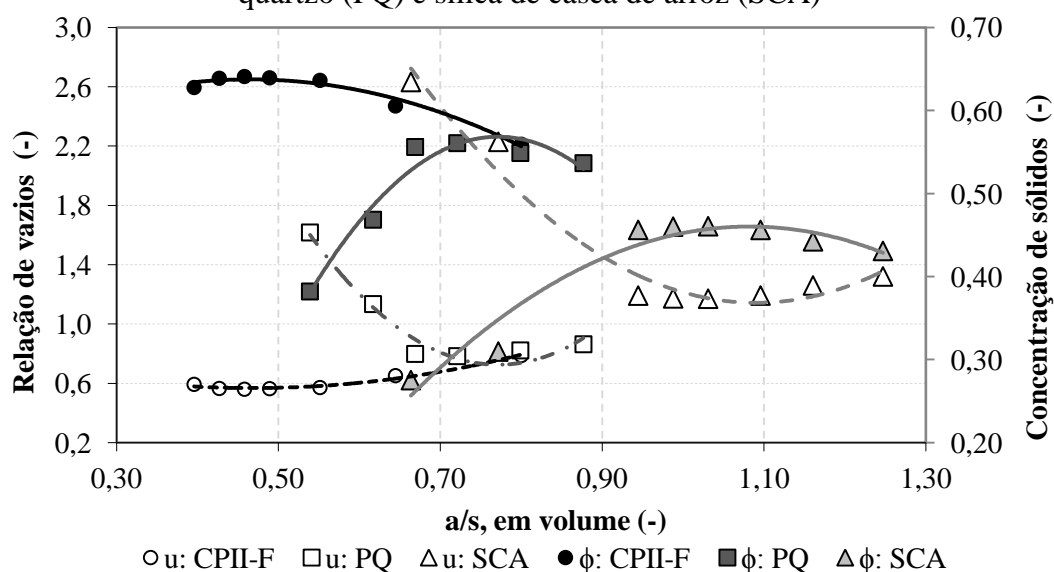
com as análises de previsão da resistência à compressão do concreto, realizadas posteriormente no item 4.3.

4.2 ESTUDO DE MATERIAIS FINOS

4.2.1 Determinação da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos

Para cada material fino utilizado determinou-se a densidade de empacotamento através do método experimental de Wong e Kwan (2008). O gráfico da Figura 27 apresenta a concentração de sólidos e relação de vazios, relacionados à relação a/s de cada material fino estudado.

Figura 27 – Concentração de sólidos (ϕ_{exp}) e relação de vazios (u) do cimento (CPII-F), pó de quartzo (PQ) e sílica de casca de arroz (SCA)



Observa-se na Figura 27 que quando a relação a/s é baixa, não há água suficiente na mistura para conectar as partículas, as quais se afastam, de modo que a concentração de sólidos é baixa e resultando em uma relação de vazios elevada. Ao aumentar a relação a/s, as partículas começam a se aproximar uma das outras pelas pontes de ligação de água criadas nos pontos de contato entre grãos, o que diminui a relação de vazios e aumenta a concentração de sólidos progressivamente.

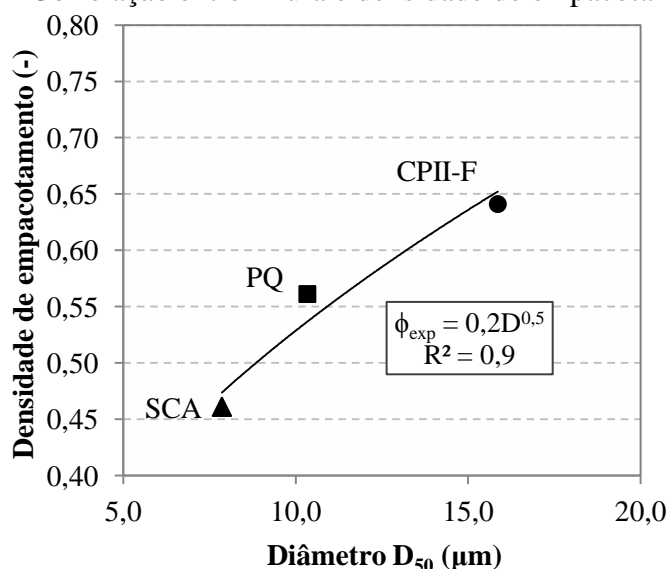
Isso ocorre até que se alcance um ponto crítico, em que a relação de vazios é mínima e a concentração de sólidos é máxima. Neste caso, as partículas estão completamente envoltas por água, o que reduz os efeitos de tensão superficial. A partir deste ponto, se a relação a/s

continuar a se elevar, as partículas voltam a se afastar devido ao excesso de água. Logo, a concentração de sólidos é reduzida e a relação de vazios aumenta.

Conforme já apresentado no item 2.2.5, a máxima concentração de sólidos corresponde à densidade de empacotamento do material fino. Para o cimento, a densidade de empacotamento atingiu o valor de 0,641, para o pó de quartzo este resultado foi de 0,561 e para a sílica de casca de arroz alcançou-se 0,461. Logo, observa-se que a densidade de empacotamento do cimento foi a maior dentre os materiais finos, os quais apresentam grande tendência de aglomeração devido à finura e às forças de atração de van der Waals existente entre as partículas. Quanto mais fino é o material, maior é a influência destas forças de atração e maior é o efeito da aglomeração (MOOSBERG-BUSTNES *et al.*, 2004; FENNIS *et al.*, 2013b). Assim, a densidade de empacotamento inferior do pó de quartzo e da sílica de casca de arroz pode ser atribuída à maior formação de aglomerados, que apresentam elevado volume de vazios em seu interior e podem atuar afastando as partículas de maior tamanho.

Isso pode ser observado no gráfico da Figura 28, o qual correlaciona a finura dos materiais em estudo, obtida por ensaio de granulometria a laser e representada pelo diâmetro D_{50} (item 3.1.1), e a densidade de empacotamento definida pela concentração de sólidos.

Figura 28 – Correlação entre finura e densidade de empacotamento (ϕ_{exp})



Observa-se pelo gráfico da Figura 28 que quanto mais fino o material, menor a densidade de empacotamento. A linha de tendência do gráfico apresentou uma relação R^2 muito próximo a 1, o que indica boa correlação entre as variáveis avaliadas.

Ainda através da Figura 27, pode-se verificar que a relação a/s equivalente a concentração de sólidos máxima para o cimento CII-F foi de 0,46, em volume, o que

corresponde a uma relação a/s de 0,15, em massa. Já para o pó de quartzo, esta relação foi de 0,72 em volume, e 0,27 em massa; e para a sílica de casca de arroz alcançou-se 1,03 em volume, representando, em massa, um valor de 0,47.

Observa-se que a sílica de casca de arroz requer mais água que o cimento e o pó de quartzo para a formação de uma pasta homogênea. Isso se deve ao fato de a sílica ser mais fina que os outros dois materiais, como se observou durante a sua caracterização. Consequentemente, a sílica tem maior superfície específica, o que requer mais água para envolver suas partículas. Além disso, ela sofre maior aglomeração que os outros materiais, de modo que uma maior quantidade de água fica aprisionada entre os aglomerados formados.

Resultados semelhantes foram observados por Hermann *et al.* (2016) em que a sílica ativa, por ser mais fina que o cimento, também demandou mais água para formação de uma pasta homogênea.

4.2.2 Estudo analítico para otimização da pasta do concreto ecológico

Após avaliar experimentalmente a densidade de empacotamento de cada um dos materiais, realizou-se um estudo analítico da proporção de finos ideal, para otimização da pasta do concreto ecológico. Desse modo, verificou-se a densidade de empacotamento de diferentes proporções dos três materiais finos estudados, aplicando o modelo CIPM (FENNIS, 2011; FENNIS *et al.*, 2013a).

Os dados de entrada usados para a aplicação do modelo são: a densidade de empacotamento de cada material (item 4.2.1, página 78), o diâmetro D_{50} das partículas (apresentados previamente na Tabela 5, página 40) e o volume relativo de cada material (proporções estabelecidas segundo critérios apresentados no item 3.3.2, página 53).

Na Tabela 17 estão dispostos os resultados de densidade de empacotamento das misturas compostas por cimento, pó de quartzo e sílica de casca de arroz, em diferentes proporções.

Tabela 17 – Densidade de empacotamento em função da variação das proporções de finos

Materiais	Proporções dos materiais (% em volume)							
Cimento	60	65	69	70	71	75	80	85
Pó de quartzo	30	25	21	20	19	15	15	10
S. de casca de arroz	10	10	10	10	10	10	5	5
Dens. Emp. Real (ϕ)	0,596	0,597	0,597	0,598	0,597	0,595	0,594	0,593

Nota-se pela Tabela 17 que a máxima densidade de empacotamento foi obtida para a proporção com 70% de cimento, 20% de pó de quarto e 10% de sílica de casca de arroz. A quantidade de sílica de casca de arroz tida como ótima, nesse estudo, vem ao encontro com dados obtidos na literatura (ISMAIL e WALIUDDIN, 1996; REDDY e ALVAREZ, 2006; SENSALÉ, 2006; ANTIOHOS *et al.*, 2014) os quais abordam que quantidades ideais de sílica de casca de arroz, em substituição parcial do cimento, encontram-se próximo a 10% com base em estudos relacionados à resistência à compressão de concretos.

Conforme o exposto, a proporção entre os materiais finos escolhida para a produção do concreto ecológico foi de 70% de cimento, 20% de pó de quartzo e 10% sílica de casca de arroz.

4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS ECOLÓGICOS

Os traços de concreto ecológico produzidos neste trabalho foram dosados através do método proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), previamente apresentado no item 3.4.2. Buscou-se obter um concreto com resistência à compressão de dosagem (f_{cd}) de 31,6 MPa, aos 28 dias, equivalente a um concreto com resistência característica (f_{ck}) de 25 MPa. Como parâmetro de cálculo, adotou-se um valor de *slump test* variando de 100 a 150 mm, correspondendo a uma relação ϕ_{mix}/ϕ igual a 0,95 (ver Tabela 14, página 60).

A dosagem se iniciou a partir do traço de referência, definido através do método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992) e apresentado no item 3.4.1 (página 55). Calculou-se a densidade de empacotamento da mistura e a previsão de resistência para o traço de referência. O cálculo da demanda de água não foi efetuado conforme o método proposto, pois o volume de água do traço de referência já estava definido. Ressalta-se que para dosagem segundo Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), todas as variáveis do traço devem ser representadas em volume, de modo que é necessário dividir o consumo de cada material do traço de referência pela sua massa específica correspondente, a fim de se obter o volume parcial (ϕ_i) de cada material sólido e da água, cuja soma deve ser aproximadamente 1. Esta transformação é apresentada na Tabela 18.

Feito isso, o volume relativo (y_i) de cada material sólido, necessário para a previsão da densidade de empacotamento, é calculado dividindo os respectivos volumes parciais (ϕ_i) pelo volume total de sólidos (V_p). Os diâmetros referentes a cada material sólido foram definidos previamente, através de suas curvas granulométricas, e a densidade de empacotamento destes materiais foi estabelecida no item 3.1.2, para os agregados e no item 4.2.1, para o cimento.

Logo, a densidade de empacotamento do conjunto pode ser calculada pelo modelo CIPM e seu resultado é apresentado na mesma Tabela 18.

Como nesse caso o cálculo se iniciou a partir de um traço de referência em que já se conhece a consistência e a quantidade de água (V_w) da mistura, aplica-se a Equação (19) (item 3.4.2) para obter o volume relativo de sólidos (ϕ_{mix}). Este valor é, então, utilizado na previsão da resistência à compressão do traço de referência, através das Equações (20) a (23) e da Figura 20, dados no Capítulo 3. Os cálculos para a previsão da resistência à compressão são apresentados em detalhes no Apêndice D. O valor da resistência à compressão prevista para o traço de referência é também apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Obtenção do volume dos materiais do traço de referência

Material	Consumo (kg/m³)	ME (kg/m³)	ϕ_i (m³/m³)	y_i (m³/m³)
Cimento	409,54	3110	0,132	0,163
Brita 1	1037,71	2670	0,389	0,481
Areia	753,88	2620	0,288	0,356
Água	217,06	1000	0,217	-
Aditivo (% m.finos)	0,00	1087	0,000	-
Relação a/c	0,53	-	-	-
Volume total de sólidos (V_p)			0,809	-
Soma total			1,026	-
Densidade de empacotamento real (-)			0,873	
Volume relativo de sólidos (ϕ_{mix})			0,783	
Fator de espaçamento do cimento (CSF)			0,74	
Previsão da resistência de dosagem (MPa)			39,6	

Observa-se pela Tabela 18 que a soma total dos volumes parciais dos materiais sólidos, incluindo a água, resulta em 1,026, sendo este valor próximo da unidade, conforme esperado. Além disso, observa-se que 78,3% da mistura é composta por sólidos ($\phi_{mix} = 0,783$). Este valor difere da densidade de empacotamento da mistura, igual a 0,873, pois a densidade de empacotamento é calculada considerando que todas as partículas estão em contato umas com as outras, de forma que o empacotamento da estrutura é estável sob influência da gravidade. Diferentemente do volume relativo de sólidos que se refere à quantidade de sólidos considerando uma mistura real, em que há fluidez promovida pelo excedente de água.

O fator de espaçamento do cimento (CSF) obtido foi de 0,74 e que prevê uma resistência à compressão de 39,6 MPa, a qual diferiu-se da resistência experimental do concreto, de 31,6 MPa, em 20%. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que a previsão da resistência pelo modelo de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b) está

exclusivamente baseada no fator de espaçamento do cimento (CSF), o qual considera o espaço necessário para a formação dos produtos de hidratação e a quantidade de água da mistura. Porém, existem outros fatores que interferem na resistência à compressão do concreto, como o tipo de cimento utilizado pelos autores do método e dos agregados adotados, os quais podem apresentar diferenças em relação aos materiais utilizados nessa pesquisa e, por isso, divergências na previsão da resistência são observadas.

Em todo caso, uma resistência prevista maior do que a desejada indica a possibilidade de reduzir a quantidade de cimento através de ajustes na mistura, buscando a melhoria da composição do esqueleto granular e da pasta.

4.3.1 Otimização da composição do esqueleto granular

Em uma primeira tentativa de melhorar a composição do traço de referência, buscou-se aprimorar primeiramente o esqueleto granular dos agregados, gerando uma curva com maior variedade de grãos através do acréscimo da brita 0. Para isso, optou-se por simular o uso das proporções de números alcançadas no estudo com agregados, previamente apresentadas na Tabela 16 (página 72). Iniciou-se a simulação com a proporção 3, composta por 20% brita 1, 30% brita 0 e 50% areia, que a foi a que apresentou maior densidade de empacotamento experimental.

O volume relativo dos agregados (y_{ag}) foi obtido através da multiplicação da porcentagem de cada material ($\%ag$) pela subtração do total da mistura e o volume relativo do cimento (y_c). Um exemplo desse cálculo pode ser acompanhado pela Equação (30), em que se demonstra o cálculo do volume relativo da brita 1, para a primeira tentativa de composição do concreto ecológico.

$$y_{ag} = \%ag \cdot (100 - y_c) \quad (30)$$

Dessa forma, aplicou-se todo o ciclo de dosagem proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), alterando as proporções dos agregados, e contrastando a resistência prevista de cada nova mistura com a resistência desejada, conforme resultados da Tabela 19.

Nesse caso, como não se tem conhecimento da quantidade de água, foi necessário calcular o seu volume (V_w) conforme Equação (19) apresentada no item 3.4.2. O volume relativo de sólidos (ϕ_{mix}) foi obtido a partir da relação ϕ_{mix}/ϕ , que foi mantida constante e igual

a 0,95, que corresponde a um concreto plástico com resultado de *slump test* variando entre 100 e 150 mm.

Tabela 19 – Resumo das tentativas para otimização dos agregados

Parâmetro		Traço de Referência	Tentativas para a composição do concreto ecológico			
			1	2	3	4
			(Proporção 20% B1, 30% B0, 50% A)*	(Proporção 22,4% B1, 33,6% B0, 44% A)	(Proporção 26% B1, 39% B0, 35% A)	(Proporção 28% B1, 42% B0, 30% A)
Volume relativo _i (%)	Brita1	48,10	16,74	18,75	21,76	23,44
	Brita0	0,00	25,11	28,12	32,64	35,15
	Areia	35,60	41,85	36,83	29,30	25,11
	Cimento	16,30	16,30	16,30	16,30	16,30
ϕ (K=12)		0,873	0,862	0,873	0,880	0,881
ϕ_{mix} (m ³)		0,783	0,819	0,829	0,836	0,837
V_w (m ³)		0,217	0,181	0,171	0,164	0,163
$f_{cd,estimada}$ (MPa)		39,6	42,7	55,6	64,3	65,6

*Em que B1 significa brita 1, B0 é brita 0 e A é areia

A partir dos resultados exibidos na Tabela 19, observa-se que a mistura 4 atingiu uma densidade de empacotamento 0,9% superior à mistura de referência, correspondendo ao valor máximo alcançado. A proporção otimizada experimentalmente, de número 1, foi a que obteve a menor densidade de empacotamento, sendo esta 2,2% inferior ao valor máximo.

Em relação às resistências previstas, o valor da mistura 4 foi 58% superior à mistura de referência, atingindo 65,6 MPa. Este valor é 52% maior do que a resistência desejada, de 31,6 MPa. Sendo assim, deu-se continuidade aos ajustes para atingir a resistência pré-estabelecida mantendo a estrutura granular 4, a qual obteve a melhor densidade de empacotamento. Além disso, a escolha fundamenta-se no fato de que a resistência prevista é bem maior que a desejada, dando uma margem para diminuir o consumo de cimento pela substituição deste por adições minerais.

4.3.2 Otimização da composição da pasta

A segunda etapa de ajustes compreendeu na otimização dos materiais que compõem a pasta, sendo realizada a substituição do cimento por pó de quartzo e sílica de casca de arroz. O pó de quartzo, por ser um fíler, age fisicamente através do refinamento dos vazios da mistura, deixando-a mais densa. Já a sílica de casca de arroz, além do efeito fíler, apresenta efeito químico pelas reações pozolânicas, atuando também como aglomerante.

A proporção otimizada entre os finos, obtida pela aplicação do modelo CIPM, foi de 70% de cimento, 20% de pó de quartzo e 10% de sílica de casca de arroz (Tabela 17, página 80). Foi simulado também proporções com mais cimento, a fim de verificar o decréscimo da resistência prevista à medida que o volume de cimento diminui, como pode ser observado pelas tentativas 5 a 9 na Tabela 20.

Tabela 20 - Otimização dos finos que compõem a pasta e resistência à compressão prevista

Materiais/ Parâmetros		Tentativas para a composição do concreto ecológico										
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Prop. agregados (%)	Brita 1	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	Brita 0	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
	Areia	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Prop. finos (%)	Cimento	90	85	80	75	70	70	70	70	70	70	70
	PQ	5	10	15	15	20	20	20	20	20	20	20
	SCA	5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10
Volume relativo γ_i (%)	Brita 1	23,44	23,44	23,44	23,44	23,44	23,80	24,08	24,22	24,25	24,28	24,33
	Brita 0	35,15	35,15	35,15	35,15	35,15	35,70	36,12	36,33	36,37	36,41	36,50
	Areia	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,50	25,8	25,95	25,98	26,01	26,07
	Agregados	83,7	83,7	83,7	83,7	83,7	85,0	86,0	86,5	86,6	86,7	86,9
	Cimento	14,67	13,86	13,04	12,23	11,41	10,50	9,8	9,45	9,38	9,31	9,17
	PQ	0,82	1,63	2,45	2,45	3,26	3,00	2,8	2,7	2,68	2,66	2,62
	SCA	0,82	0,82	0,82	1,63	1,63	1,50	1,4	1,35	1,34	1,33	1,31
	Finos	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	15,0	14,0	13,5	13,4	13,3	13,1
ϕ (K=12)		0,884	0,884	0,884	0,883	0,883	0,887	0,888	0,888	0,888	0,888	0,888
φ_{mix} (m³)		0,840	0,840	0,840	0,839	0,839	0,843	0,844	0,844	0,844	0,844	0,844
V_w (m³)		0,160	0,160	0,160	0,161	0,161	0,157	0,156	0,156	0,156	0,156	0,156
CSF (-)		0,814	0,808	0,800	0,794	0,785	0,765	0,739	0,722	0,719	0,716	0,705
fcd _{estimada} (MPa)		67,0	64,6	61,9	59,7	56,4	49,1	39,3	33,4	32,2	31,0	27,3

Em seguida, manteve-se o volume de cimento, pó de quartzo e sílica de casca de arroz fixo na proporção otimizada, reduzindo gradativamente o volume total de finos, refinando as variações assim que o valor da previsão da resistência se aproximava do desejado, como demonstrados pelas misturas 10 a 15 (Tabela 20).

A densidade de empacotamento foi calculada para cada novo conjunto granular pelo modelo CIPM. Da mesma forma, o volume de água (V_w) foi calculado conforme Equação (19) apresentada no item 3.4.2 (página 60), e o volume relativo de sólidos (φ_{mix}) foi obtido a partir

da relação φ_{mix}/ϕ , mantida constante e igual a 0,95 (concreto plástico com *slump* variando entre 100 e 150 mm). A previsão da resistência à compressão foi, então, realizada conforme roteiro de cálculo descrito no Apêndice D.

Ao analisar os resultados da Tabela 20, observa-se que a variação da resistência prevista é maior ao longo da realização dos ciclos de dosagem, enquanto que a densidade de empacotamento real (ϕ) variou muito pouco, representando apenas 0,5%. Isso ocorre, pois o cálculo da previsão da resistência está diretamente relacionado à quantidade de água na mistura, ao volume que as partículas de aglomerante ocupam e ao espaço disponível para que os produtos de hidratação do cimento se formem. Dessa forma, cada vez que o volume de aglomerante é alterado, por menor que seja a variação, a resistência prevista também irá modificar. Diferentemente do cálculo da densidade de empacotamento, que, de modo geral, avalia o comportamento das partículas sólidas quanto aos efeitos de interação entre elas. Sendo assim, mudanças pequenas no volume de cada material sólido não irão influenciar significativamente o resultado final da densidade de empacotamento. Porém, pequenas alterações no volume dos aglomerantes influenciam de forma expressiva na resistência à compressão.

Diante do apresentado, o critério de escolha da mistura para compor os concretos ecológicos foi a previsão de resistência, verificando aquela que mais se aproximou do valor desejado de 31,6 MPa. Dessa forma, a tentativa de número 13 apresentou a resistência mais próxima ($f_{cd_{estimada}} = 32,2$ MPa), sendo esta a escolhida. Ao analisar as proporções da tentativa 13 em relação ao traço de referência, verificou-se que o volume total de finos foi reduzido em 3%, substituindo 30% do cimento por sílica de casca de arroz, em um teor de 10%, e pó de quartzo, em um teor de 20%. A partir dessa mistura foram calculados dois traços de concreto ecológico.

4.3.3 Concreto Ecológico A

Em um primeiro traço, denominado de Concreto Ecológico A e apresentado na Tabela 21, realizou-se a tentativa de manter a relação a/c constante – equivalente ao traço de referência –, e igual a 0,53, em massa, ou 1,65 em volume.

Os volumes relativos (y_i) apresentados na Tabela 20 (tentativa 13) se referem somente aos materiais sólidos. Sendo assim, para calcular os consumos dos materiais é necessário considerar a quantidade de água, multiplicando os volumes relativos individuais (y_i) pelo volume relativo de sólidos (φ_{mix}), resultando nos volumes parciais (φ_i). Estes, por sua vez, são

multiplicados pela massa específica de cada material, resultando, assim, no consumo em kg/m³.

Quanto ao consumo de cimento, como nesse traço optou-se por manter a relação a/c fixa, este foi calculado em função do a/c, sendo o volume parcial do cimento (φ_i) igual a divisão do volume de água ($V_w = 0,156$) pela relação a/c, em volume (1,65). Este cálculo é mostrado na Equação (31).

$$a/c, em volume = \frac{V_w}{\varphi_i} \rightarrow \varphi_i = \frac{V_w}{a/c, em volume} \quad (31)$$

O quociente foi, então, multiplicado pela massa específica do cimento, resultando em um consumo de 294,04 kg/m³.

Ressalta-se que os cálculos foram feitos com auxílio de planilha eletrônica do Microsoft Office Excel, utilizando todas as casas decimais que o programa aceita. Porém, optou-se por representar na Tabela 21 um máximo de 4 casas decimais, para o volume relativo.

Tabela 21 – Obtenção do consumo de materiais do Concreto Ecológico A

Material	Consumo (kg/m ³)	ME (kg/m ³)	φ_i (m ³ /m ³)	y_i (m ³ /m ³)
Cimento	294,04	3110	0,095	0,0938
Pó de quartzo	58,81	2600	0,023	0,0268
Sílica de casca de arroz	24,43	2160	0,011	0,0134
Brita 1	546,42	2670	0,205	0,2425
Brita 0	859,54	2800	0,307	0,3637
Areia	574,49	2620	0,219	0,2598
Água	156,00	1000	0,156	-
Aditivo	0,00	1087	0,000	-
Relação a/c	0,53	-	-	-
Relação a/finos	0,41	-	-	-
Volume relativo de sólidos (φ_{mix})			0,844	-
Soma total			1,015	-

Nota-se pela análise da Tabela 21 que a tentativa de manter a relação a/c constante (igual a 0,53) acarretou na alteração da proporção entre os finos. Com um consumo total de finos igual a 377,28 kg/m³, a quantidade de cimento corresponde a 78%, a de pó de quartzo 16% e a sílica de casca de arroz a 6%, diferente das proporções estabelecidas anteriormente (70% de cimento, 20% de pó de quartzo e 10% de sílica de casca de arroz). Como a diferença entre os valores foi baixa, optou-se por produzir esse concreto, a fim de verificar o seu comportamento no estado fresco e endurecido.

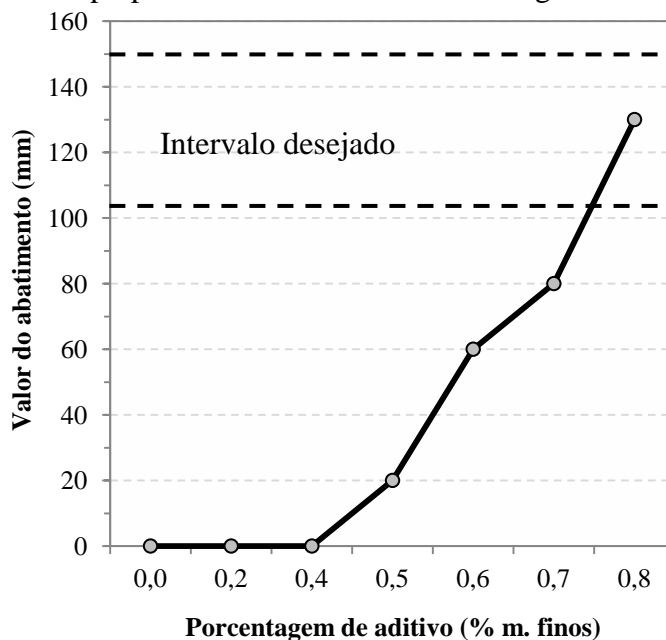
Acrescenta-se que ao verificar as proporções estabelecidas na Tabela 20 (página 85) observa-se que a tentativa 9 é a que apresenta a relação a/c mais próxima à 0,53. Se calcular o consumo de cimento multiplicando o seu volume relativo (0,1141) pelo volume relativo de sólidos (0,837) e pela massa específica (3110 kg/m^3) se atinge um consumo de $297,7 \text{ kg/m}^3$. Dividindo o volume de água (161 m^3) pelo consumo resulta uma relação a/c de 0,54. Por outro lado, a previsão de resistência dessa tentativa é de 56,4 MPa, 44% superior à resistência desejada de 31,6 MPa. Sendo assim, o critério de escolha da proporção entre materiais para compor o concreto ecológico teria que ser baseado exclusivamente na relação a/c, excluindo o valor de resistência alcançada. Como o parâmetro de decisão desse trabalho é a resistência à compressão, optou-se por continuar a produção a partir da tentativa 13 e do traço exposto na Tabela 21.

É importante ressaltar que quando o cimento é substituído por fillers pode ocorrer perda da consistência, devido a fatores como o tamanho, área superficial, forma e porosidade das partículas. Moosberg-Bustnes *et al.* (2004) avaliaram pastas com teores de substituição do cimento de 10 a 50% por pó de quartzo e verificaram que quanto maior o teor de substituição, mais seca ficou a pasta. Para que todas as misturas tivessem a mesma consistência, a solução proposta pelos autores foi acrescentar aos poucos aditivo superplastificante até obterem a consistência desejada.

Em relação à consistência do concreto, o traço não apresentou o valor de abatimento desejado, entre 100 e 150 mm. Portanto, optou-se por acrescentar aditivo superplastificante Glenium 51, para dispersar a mistura e atingir a consistência previamente estabelecida. O uso do aditivo já era previsto, uma vez que os materiais finos foram caracterizados em relação à densidade de empacotamento utilizando esse aditivo, e, conseqüentemente, todos os cálculos da dosagem foram baseados nessas condições de caracterização.

Dessa forma, o aditivo foi sendo adicionado aos poucos, em intervalos de 0,1% da massa de finos, mantendo um tempo de mistura de 7 minutos a cada nova adição, para garantir a ação do aditivo. Em cada etapa (cada nova adição do superplastificante), realizou-se também o ensaio de *slump test*. O gráfico da Figura 29 demonstra a influência do acréscimo do aditivo em função do valor do abatimento do concreto.

Figura 29 – Variação do abatimento do concreto em função do acréscimo do aditivo superplastificante no Concreto Ecológico A



Observa-se que somente após acrescentar 0,5% de aditivo foi possível observar o abatimento do concreto, que resultou em 20 mm. Apenas com uma quantidade de 0,8% de aditivo, em relação à massa de finos, o resultado do ensaio de *slump test* foi igual a 130 mm, ficando dentro do intervalo previsto. Mais considerações quanto à caracterização do Concreto Ecológico A em estado fresco encontram-se descritas no item 4.4.1.

Cabe salientar que junto com o aditivo foi acrescentada uma quantidade de 200 ml de água em cada acréscimo, para garantir total homogeneização, e para que toda a porção de concreto fosse dispersa pelo aditivo.

Dessa forma, o consumo de água final, assim como a relação a/c foram alterados. Essa quantidade a mais de água modifica o volume relativo de sólidos da mistura, o que irá influenciar na resistência experimental do concreto, bem como o cálculo da previsão de resistência. Sendo assim, realizou-se a correção do consumo de água, calculando-se novamente a densidade de empacotamento do conjunto, o volume relativo de sólidos e a resistência prevista. Os resultados das alterações de traço estão descritos na Tabela 22.

Tabela 22 – Correção da água e novos parâmetros para cálculo da previsão de resistência do Concreto Ecológico A

Material/ Propriedade	Traço Ecológico A calculado		Traço Ecológico A produzido			
	Consumo (kg/m³)	y_i (m³/m³)	Consumo (kg/m³)	ME (kg/m³)	φ_i (m³/m³)	y_i (m³/m³)
Cimento	294,04	0,0938	294,04	3110	0,095	0,1114
Pó de quartzo	58,81	0,0268	58,81	2600	0,023	0,0266
Sílica de casca de arroz	24,43	0,0134	24,43	2160	0,011	0,0133
Brita 1	546,42	0,2425	546,42	2670	0,205	0,2410
Brita 0	859,54	0,3637	859,54	2800	0,307	0,3615
Areia	574,49	0,2598	574,49	2620	0,209	0,2461
Água	156,00	-	170,54	1000	0,171	-
Aditivo (0,8% m.f.)	0,00	-	3,02	1087	0,0028	-
Relação a/c	0,53		0,58			
Relação a/finos	0,41		0,45			
Dens. Emp. Real (ϕ)	0,888		0,886			
Volume relativo de sólidos (φ_{mix})	0,888.0,95 = 0,844		1 - 0,171 = 0,829			
f_{cd} estimada (MPa)	32,2		46,9			

Nota-se pela Tabela 22 que ao aumentar a quantidade de água na mistura, o volume relativo de sólidos (φ_{mix}) diminui, passando de 0,844 para 0,829. No caso do Concreto Ecológico A produzido, o valor de φ_{mix} foi calculado pela Equação (19) apresentada no item 3.4.2 (por já se ter conhecimento da quantidade de água e da consistência). Este fato tem influência no volume relativo individual (y_i) de cada material, sendo esta maior para o cimento em comparação aos demais materiais. Observa-se que o volume relativo do cimento tem um acréscimo de 18,7%, enquanto os outros materiais sofrem alterações muito pequenas. Isso se deve ao fato de que o cálculo do volume parcial (φ_i) do cimento foi feito inicialmente respeitando a relação a/c obtida para o traço de referência, enquanto que o volume parcial dos outros materiais foi calculado através da multiplicação dos volumes relativos individuais (y_i) pelo volume relativo de sólidos (φ_{mix}).

A alteração no volume relativo individual (y_i) dos materiais, especialmente do cimento, provoca uma pequena alteração na densidade de empacotamento do conjunto. Por outro lado, a influência na resistência à compressão prevista é significativa, conforme já mencionado anteriormente. Assim, a resistência à compressão prevista, aos 28 dias, teve um acréscimo de 30%, passando de 32,2 MPa para 46,9 MPa, mesmo com mais água na mistura. Uma hipótese a esse comportamento pode estar relacionada ao espaço necessário para a formação dos compostos hidratados do cimento. Conforme a Lei de Abrams, ao aumentar a relação a/c obtém-se uma redução da resistência à compressão do concreto. Entretanto, a previsão de

resistência através do método proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b) considera a distância entre as partículas (representada por $\varphi_{cem}/\varphi_{cem}^*$) para a formação dos produtos de hidratação. Em uma mistura bem empacotada, esse espaço é reduzido devido à proximidade dos grãos, o que prejudicaria a formação dos produtos hidratação do cimento e comprometeria a resistência final. Ao acrescentar mais água, o espaço entre os grãos aumenta o que favorece a formação dos compostos, e resulta na elevação da resistência à compressão. Entretanto, é necessário realizar estudos e experimentos que comprovem tal teoria.

Por fim, todas as comparações pertinentes ao traço do Concreto Ecológico A relacionadas aos ensaios mecânicos e de durabilidade serão realizadas com o traço efetivamente produzido, considerando a correção de água realizada.

4.3.4 Concreto Ecológico B

No segundo traço ecológico produzido, optou-se por não manter constante a relação a/c, calculando o consumo de cimento do mesmo modo que os outros materiais. Ou seja, pela multiplicação dos volumes relativos individuais (y_i) e volume relativo de sólidos (φ_{mix}) obtendo os volumes parciais (φ_i). Estes são, então, multiplicados pela massa específica de cada material, resultando no consumo. Ressalta-se que se partiu dos mesmos volumes relativos individuais calculados previamente, referente à tentativa 13, expressa na Tabela 20 (página 85). Assim, o novo traço com previsão de resistência de 32,2 MPa, denominado de Concreto Ecológico B, encontra-se na Tabela 23.

Tabela 23 – Obtenção do consumo de materiais do Concreto Ecológico B

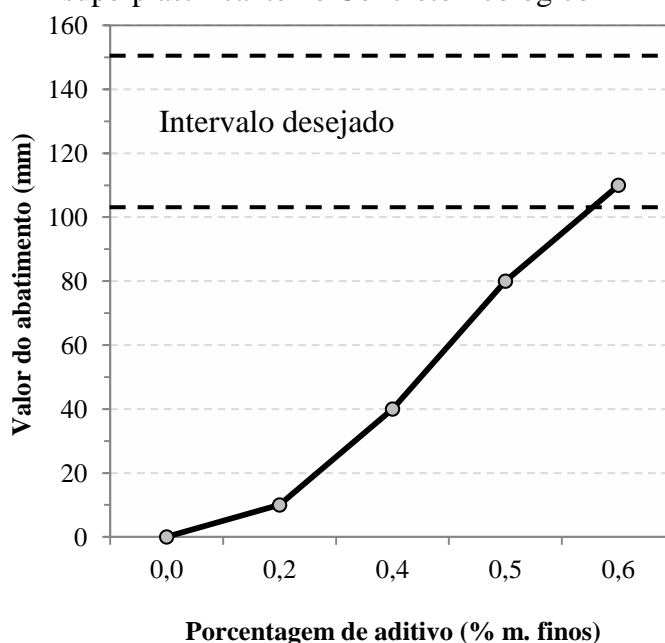
Material	Consumo (kg/m³)	ME (kg/m³)	φ_i (m³/m³)	y_i (m³/m³)
Cimento	246,21	3110	0,079	0,0938
Pó de quartzo	58,81	2600	0,023	0,0268
Sílica de casca de arroz	24,43	2160	0,011	0,0134
Brita 1	546,42	2670	0,205	0,2425
Brita 0	859,54	2800	0,307	0,3637
Areia	574,49	2620	0,219	0,2598
Água	156,00	1000	0,156	-
Aditivo (0,4% m.agl.)*	1,32	1087	0,0012	-
Relação a/c	0,63	-	-	-
Relação a/finos	0,47	-	-	-
Volume relativo de sólidos (φ_{mix})			0,844	-
Soma total			1,015	-

*O aditivo foi utilizado durante a produção para ajustar a consistência do concreto

Semelhantemente ao Concreto Ecológico A, o Concreto Ecológico B não apresentou o valor de abatimento desejado, entre 100 e 150 mm. Portanto, optou-se também por acrescentar aditivo superplastificante Glenium 51, como descrito anteriormente, para corrigir a consistência do concreto. Porém, utilizando a própria água de amassamento para ser acrescida junto com o aditivo (separou-se 200 ml de água para este fim antes de iniciar a produção). Dessa forma, não houve alteração na relação a/c, nem na relação a/finos.

Nesse caso, após acrescentar 0,4% de aditivo, em relação à massa de finos, o concreto atingiu 110 mm de abatimento, ficando dentro do intervalo previsto, como demonstrado no gráfico da Figura 30. Mais considerações acerca das propriedades do Concreto Ecológico B em estado fresco encontram-se no item 4.4.1.

Figura 30 – Variação do abatimento do concreto em função do acréscimo do aditivo superplastificante no Concreto Ecológico B



Para finalizar, a Tabela 24 apresenta os traços referentes aos três concretos produzidos. Observa-se que a redução do consumo de cimento foi de 115 kg/m³ para o traço do Concreto Ecológico A e 163 kg/m³ para o traço do Concreto Ecológico B.

Ressalta-se ainda que o Concreto Ecológico B não se enquadraria nas recomendações da norma brasileira NBR 12.655 (ABNT, 2015), por apresentar consumo de cimento inferior a 280 kg/m³ e relação a/c superior a 0,60.

Tabela 24 – Consumo de materiais e parâmetros dos concretos produzidos

Material/Parâmetro	Consumo (kg/m ³)		
	Referência	Ecológico A	Ecológico B
Cimento	409,54	294,04	246,21
Pó de quartzo	-	58,81	58,81
Sílica de casca de arroz	-	24,43	24,43
Brita 1	1031,71	546,42	546,42
Brita 0	-	859,54	859,54
Areia	753,88	574,49	574,49
Água	217,16	170,54	156,0
Aditivo	0,00	3,02	1,32
Relação a/c	0,53	0,58	0,63
Relação a/finos	0,53	0,45	0,47
Volume relativo de sólidos (ϕ_{mix})	0,783	0,829	0,844
Fator de espaçamento do cimento (<i>CSF</i>)	0,739	0,759	0,719
Resistência prevista (MPa)	39,6	46,9	32,2

Com as informações dos traços constantes na Tabela 24 é possível calcular o teor de argamassa dos concretos. Para o concreto de referência o teor é de 0,53, já para o Concreto Ecológico A é de 0,40 e para o Ecológico B é de 0,38. Nota-se que o teor reduziu em 24 e 28% do concreto de referência para o Ecológico A e B, respectivamente. Isso pode trazer influências no comportamento desses concretos em estado fresco, conforme abordagem que será feita posteriormente.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E ESTUDOS COMPLEMENTARES

Nos itens que segue serão apresentados os resultados e análises referentes à caracterização dos concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, para o concreto de referência e os concretos ecológicos. Os resultados completos, para cada corpo de prova individualmente, bem como os resultados das análises estatísticas encontram-se dispostos detalhadamente no Apêndice E.

4.4.1 Ensaios em estado fresco

Os resultados dos ensaios realizados no estado fresco do concreto encontram-se apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Propriedades dos concretos no estado fresco

Propriedade	Concretos		
	Referência (Cc=409 kg/m³)	Ecológico A (Cc=294 kg/m³)	Ecológico B (Cc=246 kg/m³)
Massa específica (kg/m³)	2.380	2.460	2.450
Massa específica teórica (kg/m³)	2.412	2.531	2.467
Ar aprisionado teórico (%)	3,2	7,1	1,7
Consistência (cm)	10	13	12

Verifica-se pela Tabela 25 que o concreto de referência atingiu uma massa específica no estado fresco de aproximadamente 2.400 kg/m³. Os concretos ecológicos apresentaram massa específica levemente mais elevada que o concreto de referência, o que é resultado do empacotamento de partículas empregado. Os resultados teóricos se mostraram levemente superiores aos experimentais. Em relação ao ar aprisionado calculado notou-se que o Concreto Ecológico A apresentou o maior resultado, seguido pelo concreto de referência e Ecológico B.

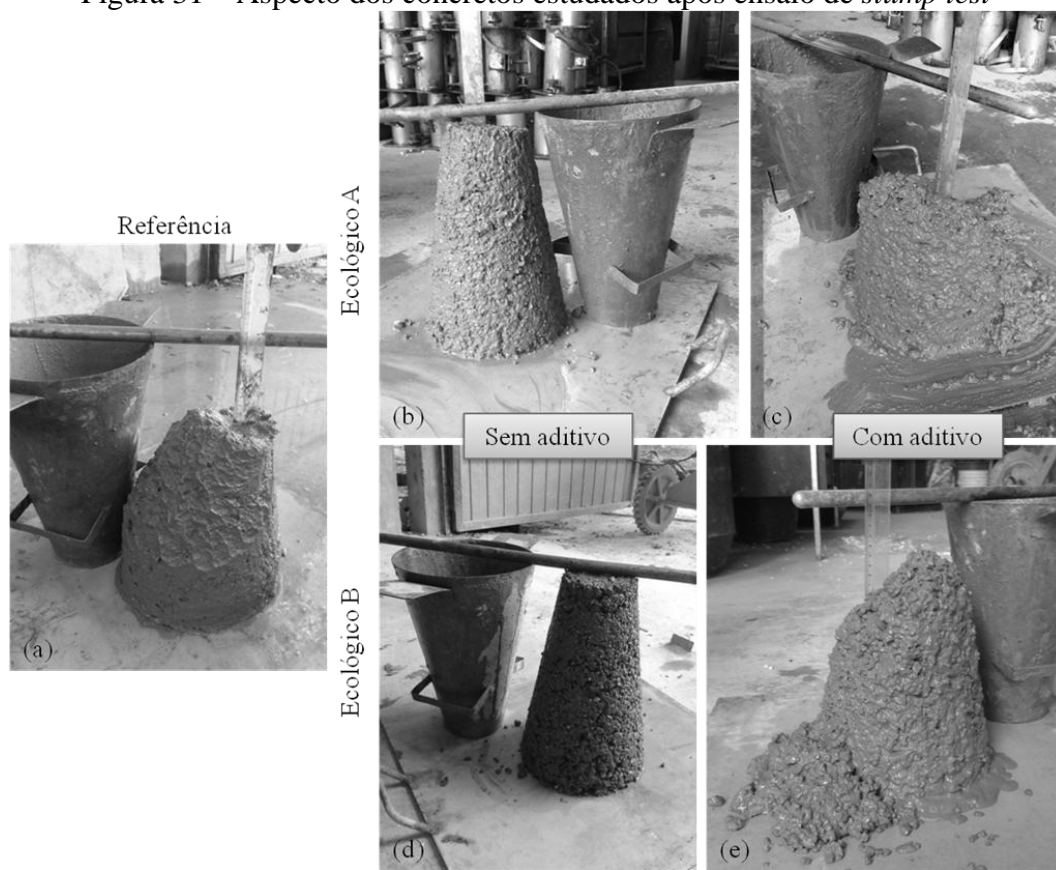
Conforme a Tabela 25 constatou-se que a consistência dos três concretos produzidos encontra-se na faixa previamente estabelecida de 100 a 150 mm, caracterizando um concreto plástico segundo método proposto por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b). Verifica-se que os dois ecológicos apresentaram abatimento levemente superior ao do concreto de referência.

Cabe ressaltar que ambos os concretos ecológicos apresentaram problemas de consistência demonstrando que a relação ϕ_{mix}/ϕ , mantida igual a 0,95 não resultou em um concreto plástico com *slump* variando entre 100 e 150 mm. Para alcançar essa condição, foi necessário acrescentar aditivo superplastificante nos concretos ecológicos. Desse modo, acrescenta-se a necessidade de, em conjunto com a aplicação do método de dosagem, verificar questões relacionadas ao teor de argamassa e a relação entre a água e os materiais secos em uma tentativa de prever e evitar problemas de consistência. Moosberg-Bustnes *et al.* (2004) também ressaltam que a substituição do cimento por filers pode levar a uma perda da consistência, devido a fatores como o tamanho, área superficial, forma e porosidade das partículas.

No caso do concreto de referência, não foi usado o aditivo químico. Se tivessem sido usados, estes poderiam ter reduzido o consumo de cimento. Porém, optou-se por produzir um concreto convencional sem o uso de adições e de aditivos químicos, buscando verificar o efeito da relação ϕ_{mix}/ϕ proposta por Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b).

Através da Figura 31 é possível observar o aspecto dos concretos após a realização do ensaio de *slump test*.

Figura 31 – Aspecto dos concretos estudados após ensaio de *slump test*



Pela Figura 31 (a) nota-se que o concreto de referência apresentou um bom teor de argamassa em sua composição, pois não é possível identificar os grãos da brita na superfície lateral do concreto. Por outro lado, nos concretos ecológicos é possível visualizar espaços vazios entre os grãos do agregado graúdo, especialmente nas misturas sem aditivo, tal como mostrado na Figura 31 (b) e (d). Isso pode indicar teor de argamassa insuficiente, o que foi previsto durante a determinação dos traços (Tabela 24, página 93), uma vez que os concretos ecológicos A e B resultaram em teores 24 e 28% inferiores, respectivamente, ao teor de argamassa do concreto de referência.

Durante a determinação dos traços ecológicos houve redução do volume total de finos em 2,4% para o Concreto Ecológico A e 14,4% para o Concreto Ecológico B em relação ao concreto de referência. O volume de água, e, conseqüentemente, do volume de pasta também foram reduzidos em 14,3 e 23% para os Concretos Ecológicos A e B, respectivamente.

Assim, uma explicação possível é o fato de que o esqueleto granular dos concretos ecológicos apresentou um volume de vazios de 30% (item 4.1.2), o qual é preenchido pelo volume de pasta. Os Concretos Ecológicos A e B foram produzidos com um volume de pasta igual a 29 e 26,9%, respectivamente. Ou seja, o primeiro apresentou a quantidade de pasta

exata para preencher os vazios entre os agregados, enquanto que o segundo demonstrou ausência de pasta para ocupar os vazios.

Ressalta-se que o acréscimo de aditivo fez com que a argamassa preenchesse de forma mais eficiente os espaços vazios entre o agregado graúdo, já que é mais difícil de identificar os grãos nesta condição. O uso deste aditivo aumentou significativamente a consistência, pelo fato de causar a dispersão das partículas finas e liberar a água previamente presa nos aglomerados para lubrificar a mistura.

É importante ressaltar que ambos os concretos ecológicos apresentaram elevada coesão da pasta após ajuste da consistência com o aditivo. Porém, devido à falta de argamassa e a uma alta plasticidade observou-se o desmoronamento da parte superior do cone de concreto, como representado na Figura 31 (c) e (e). Esse comportamento coesivo da pasta está relacionado ao empacotamento das partículas finas que promove a redução dos vazios entre os grãos deixando o concreto mais denso.

Durante a produção foi necessário alterar a quantidade de golpes para adensamento dos corpos de prova moldados, passando dos 12 golpes recomendados pela NBR 5738 (ABNT, 2015) para 20 golpes em cada uma das duas camadas, a fim de garantir a homogeneidade dos corpos de prova. Para o ensaio de *slump test* foi mantido o adensamento recomendado pela norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Esse contratempo está atrelado ao empacotamento de partículas elevado, especialmente do esqueleto granular que dificulta a penetração da haste de adensamento no concreto.

É interessante comentar que se os concretos ecológicos fossem aplicados em obras convencionais poderiam ser verificadas dificuldades durante o lançamento e o adensamento, devido às condições de coesão e plasticidade observadas. Quanto ao lançamento, tendo como exemplo o uso de bombeamento, é importante a realização de estudos que verifiquem a bombeabilidade dos concretos ecológicos. Porém, uma alternativa para isso seria a utilização de caçambas, as quais comportam uma grande quantidade de concreto e podem ser carregadas através de guias e guindastes.

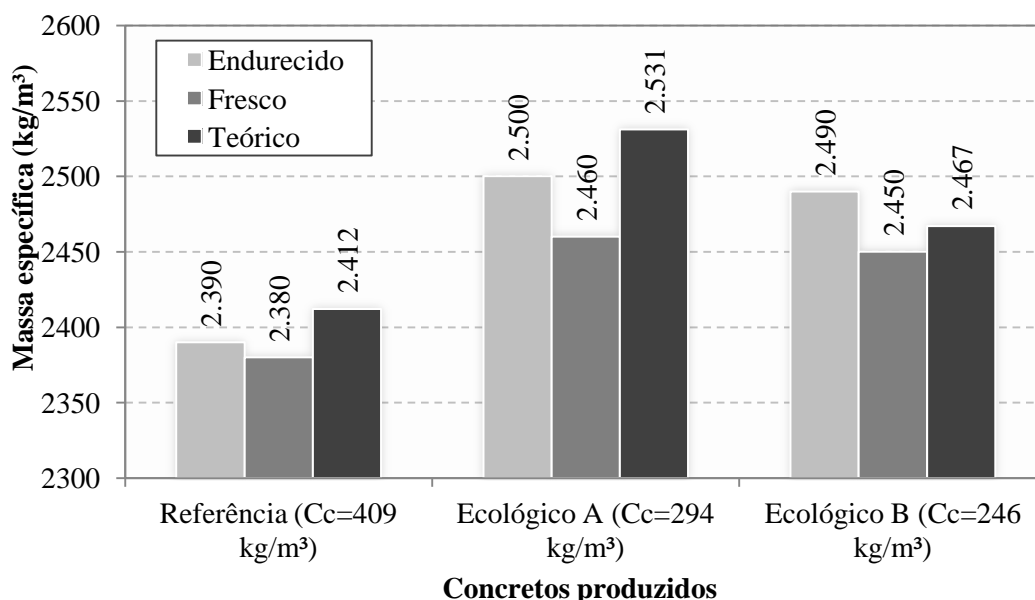
Sobre os problemas relacionados ao adensamento, estes poderiam ser resolvidos com a utilização de vibradores de imersão, os quais iriam garantir maior eliminação do ar incorporado pelo lançamento. Por outro lado, devido à estrutura granular mais densa do concreto, seria necessário um tempo maior e/ou mais imersões para garantir total adensamento. Sendo assim, a aplicação dos concretos em centrais de pré-moldados se mostraria mais vantajosa, pela capacidade de utilização de formas vibratórias e facilidade de lançamento e transporte do concreto.

4.4.2 Massa específica do concreto endurecido e ensaios mecânicos

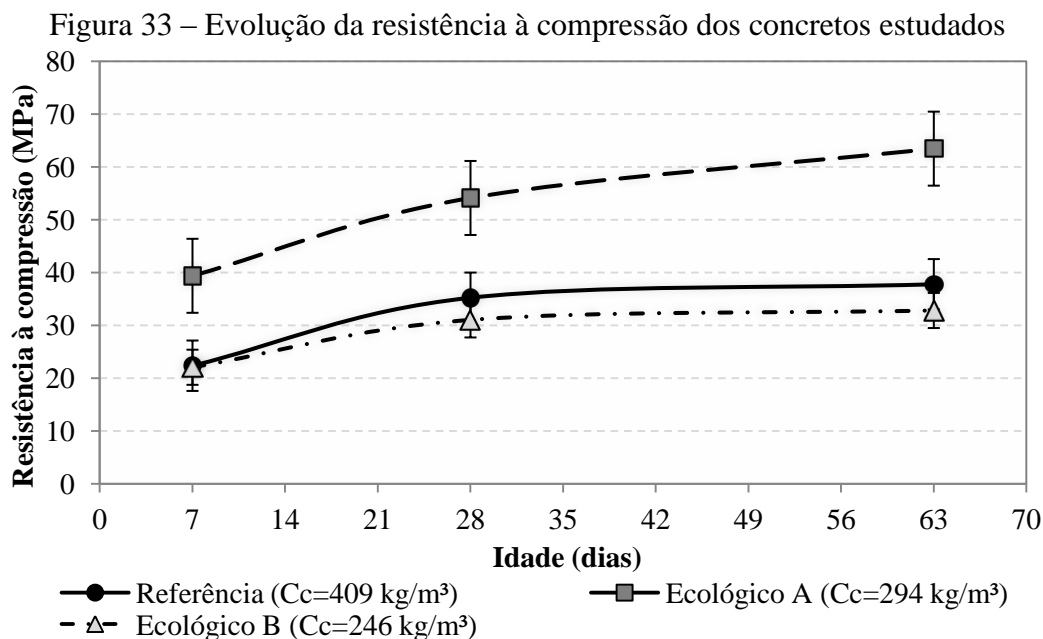
Neste item serão apresentados os resultados de massa específica do concreto endurecido e os resultados de caracterização mecânica do concreto.

A massa específica do concreto em estado endurecido, determinada nas mesmas idades de ensaio de resistência à compressão, foi medida na condição saturada com superfície seca. A verificação foi feita através da medição da massa e do volume dos corpos de prova, sendo o volume obtido pela mensuração das dimensões com paquímetro. Realizou-se três leituras de diâmetros na base e no topo dos corpos de prova, obtendo como resultado final a média. O concreto de referência obteve uma massa específica de 2.390 kg/m^3 enquanto que os concretos Ecológicos A e B apresentaram massa específica de 2.500 kg/m^3 e 2.480 kg/m^3 , respectivamente e conforme gráfico da Figura 32. Logo, os resultados obtidos são próximos as massas específicas teóricas calculadas de acordo com os traços, e verificadas através de ensaio no estado fresco.

Figura 32 – Comparação entre os resultados de massa específica dos concretos em estado fresco e endurecido



Em relação aos resultados mecânicos dos concretos desenvolvidos, observa-se na Figura 33 a evolução da resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 63 dias.



Pela análise da Figura 33, verifica-se que os três concretos produzidos superaram a resistência à compressão desejada, aos 28 dias. Verifica-se também que o Concreto Ecológico A apresentou resistências à compressão, em média, 35% superiores ao concreto de referência. Com 115 kg/m³ a menos de cimento do que o concreto de referência, o Concreto Ecológico A alcançou 54,1 MPa de resistência, aos 28 dias. Isso se deve tanto ao efeito físico do empacotamento de partículas, dos agregados e dos finos, quanto à baixa relação água/finos utilizada, igual a 0,45. Estas condições permitem reduzir a quantidade de vazios do concreto, deixando-o mais denso e resistente mecanicamente.

No caso do Concreto Ecológico B, ao diminuir o cimento em 163 kg/m³ a redução de resistência à compressão foi de apenas 8%, em média, em relação ao concreto de referência, sendo o que mais se aproximou da resistência à compressão desejada aos 28 dias, de 31,6 MPa. Essa diferença está relacionada ao fato do consumo de cimento ser inferior, porém considera-se que esse concreto atingiu resultados positivos, uma vez que a resistência atingida o classifica como concreto estrutural (NBR 6118 ABNT, 2014) e cumpre com as previsões e objetivos estabelecidos.

Ao realizar análise de variância pelo método ANOVA foi possível constatar que ambos os concretos de referência e Ecológico B podem ser considerados estatisticamente iguais, com uma confiabilidade de 95%. A análise é apresentada no Apêndice E. Isso demonstra o fato de que é possível dosar um concreto com menor consumo de cimento, através de modelos de empacotamento de partículas, que se comporte semelhantemente a um concreto convencional, quanto à resistência à compressão.

Comparando os resultados experimentais com as previsões de resistência à compressão estabelecidas pelo método de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), tem-se a Tabela 26.

Tabela 26 – Comparação dos resultados experimentais com a resistência prevista pelo método de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b)

Forma de obtenção da resistência	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)		
	Referência (Cc=409 kg/m ³)	Ecológico A (Cc=295 kg/m ³)	Ecológico B (Cc=246 kg/m ³)
Previsão pelo método de dosagem	39,6	46,9	32,2
Resultado experimental	35,2 ↓ 11%	54,1 ↑ 13%	31,0 ↓ 4%

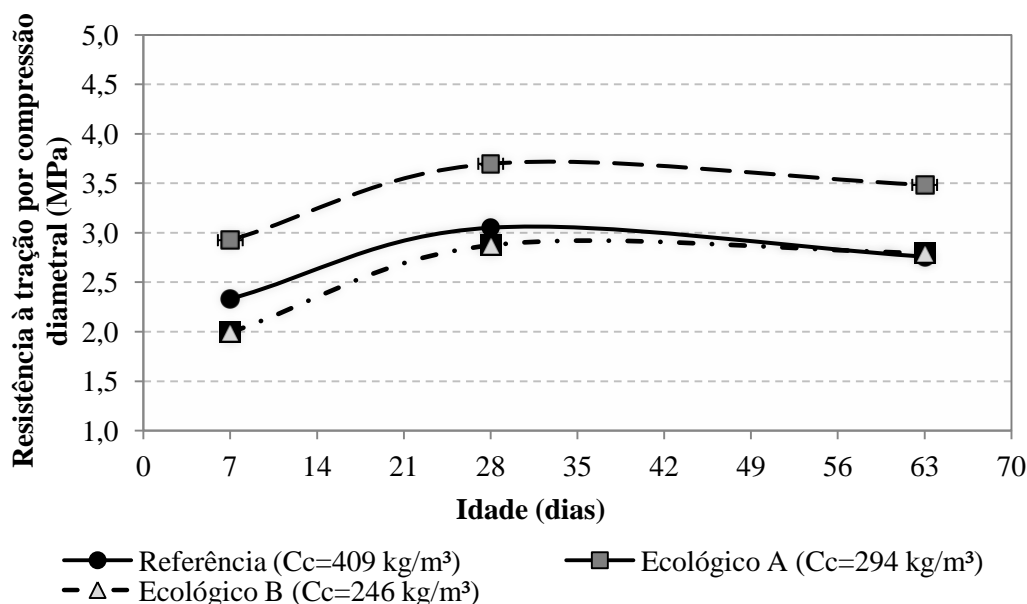
A Tabela 26 demonstra que a diferença entre a resistência à compressão prevista pelo modelo e os resultados experimentais foi inferior a 15%. Este resultado pode ser considerado satisfatório em se tratando da previsão do concreto por um modelo de empacotamento de partículas, o qual analisa o comportamento da mistura sob o ponto de vista físico, sem considerar a parte química que envolve a hidratação do cimento, por exemplo.

É natural que exista diferença entre os resultados experimentais e teóricos, pois os modelos são elaborados, muitas vezes, a partir de simplificações e de dados experimentais de um determinado conjunto de materiais. Ao se usar outros materiais nas campanhas experimentais, então, diferenças também podem ser observadas. Ademais, variabilidades de ensaio relacionadas à temperatura e umidade nos dias de produção também podem influenciar nos resultados experimentais de resistência à compressão.

Finalmente, observa-se ainda que todos os concretos superaram a marca de 25 MPa aos 28 dias, resistência considerada limite para a classe de agressividade II preconizada na norma NBR 12655 (ABNT, 2015).

Conclusões semelhantes foram obtidas ao avaliar resistência à tração por compressão diametral dos concretos em estudo nas idades de 7, 28 e 63 dias, tal como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados



Observa-se pela Figura 34, que o Concreto Ecológico A apresentou resultados médios 16% superiores ao concreto de referência, alcançando 3,5 MPa aos 63 dias. Resultado este relacionado ao efeito físico do empacotamento de partículas e a uma baixa relação água/finos, igual a 0,45, fatores que permitem reduzir os poros do concreto deixando-o mais denso. Ressalta-se que este Concreto Ecológico A alcançou resultado superior ao concreto de referência, mesmo com um consumo de cimento 28% inferior.

Em relação ao Concreto Ecológico B os resultados foram em média, 10% inferiores ao concreto de referência nas idades de 7 e 28 dias, se igualando na idade de 63 dias, com uma resistência de 2,8 MPa. Logo, com 163 kg/m³ a menos de cimento o Concreto Ecológico B manteve a mesma resistência à tração do concreto de referência. Isso foi demonstrado também ao aplicar o método ANOVA para análise de variância, em que constatou-se que ambos os concretos de referência e Ecológico B podem ser considerados estatisticamente iguais, com uma confiabilidade de 95%. A análise é apresentada no Apêndice E. Isso denota a possibilidade de dosar um concreto com menor consumo de cimento, através de modelos de empacotamento de partículas, que tenha comportamento semelhante a um concreto convencional, quanto à resistência à tração por compressão diametral.

Nota-se um leve decréscimo na evolução da resistência dos 28 para os 63 dias, para os três concretos avaliados. Porém, ao aplicar análise através de tabela ANOVA os resultados de resistência à tração por compressão diametral nessas idades podem ser considerados estatisticamente equivalentes.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve uma equação, Equação (32), para estimativa de resistência a tração direta (f_{ct}) para concretos de classe até 50 MPa, C50, em função da resistência à compressão (f_c) obtida aos 28 dias, em MPa.

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_c^{2/3} \quad (32)$$

Dessa forma, a Tabela 27 apresenta uma comparação entre os valores experimentais de resistência à tração por compressão diametral e a estimativa teórica da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) levando em consideração a resistência à compressão obtida aos 28 dias. Cabe salientar que diferenças são esperadas, uma vez que a norma não apresenta relações teóricas para obtenção de tração por compressão diametral, sendo assim, a comparação foi feita através de estimativa com a resistência à tração direta.

Tabela 27 – Comparação entre os valores experimentais de resistência à tração por compressão diametral e os resultados teóricos, calculados com base na resistência à compressão, aos 28 dias

Forma de obtenção da resistência	Valores de resistência, aos 28 dias (MPa)		
	Referência (Cc=409 kg/m ³)	Ecológico A (Cc=294 kg/m ³)	Ecológico B (Cc=246 kg/m ³)
Resistência à compressão, experimental	35,2	54,1	31,0
Resistência à tração por compressão diametral, experimental	3,1	3,7	2,9
Resistência à tração direta, previsão pela NBR 6118 (ABNT, 2014)	3,2	4,3	3,0

Através da Tabela 27, constata-se que os resultados experimentais alcançados para a resistência à tração por compressão diametral ficaram muito próximos da previsão teórica feita segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), para os concretos de referência e Ecológico B a diferença foi de 3%. O concreto Ecológico A foi o que apresentou a maior variação, de 14%, para com a previsão teórica.

Ao comparar os resultados de todas as idades dos ensaios de resistência à compressão com os de resistência à tração por compressão diametral, verificou-se que a relação entre tração e compressão foi de 11%, em média, para o concreto de referência e Concreto Ecológico B. Já para o Concreto Ecológico A, a proporção foi de 15%, em média.

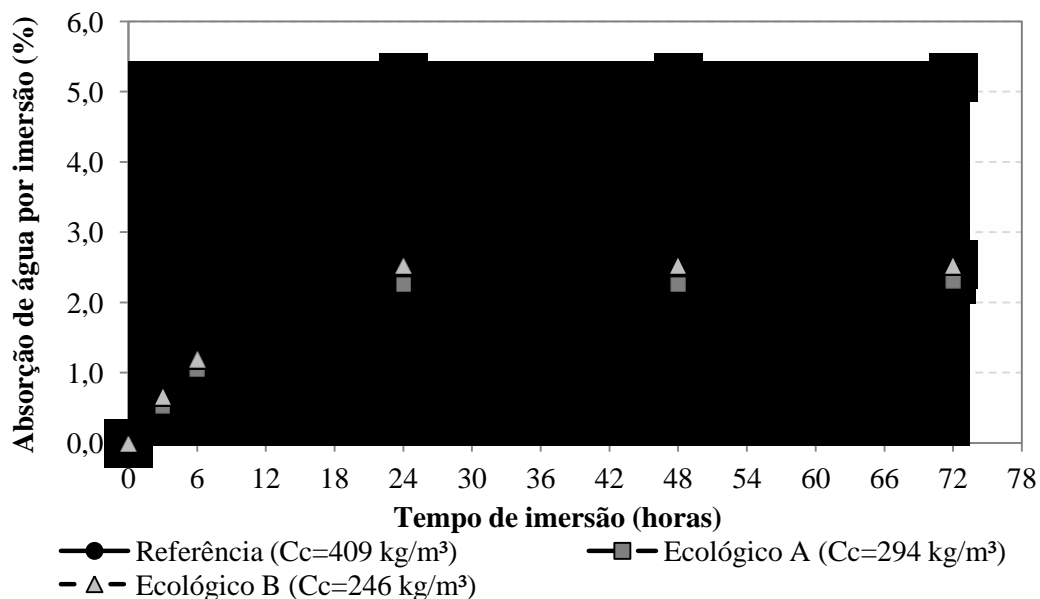
4.4.3 Ensaios de durabilidade

De acordo com as informações apresentadas no Capítulo 3, os concretos desenvolvidos foram avaliados quanto a aspectos de durabilidade. Assim, os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico são exibidos a seguir.

a) Absorção de água por imersão

Conforme já apresentado na seção 3.5.3 o ensaio de absorção de água por imersão foi realizado após 28 dias de cura úmida e três dias de secagem em estufa para estabilização e constância de massa. O gráfico da Figura 35 mostra a evolução da absorção de água por imersão dos concretos estudados com o passar do tempo.

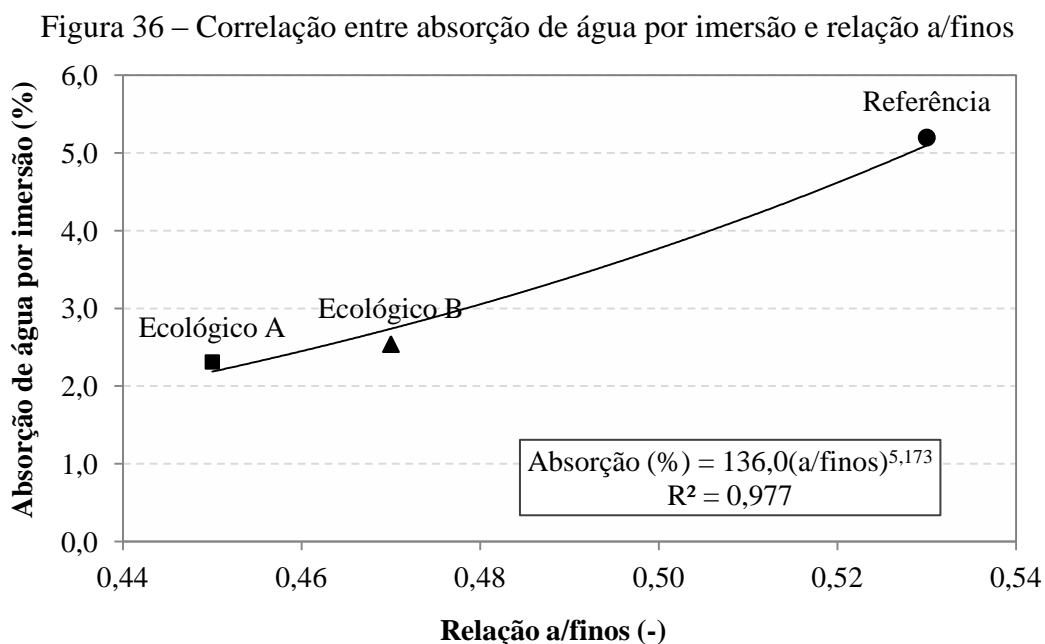
Figura 35 – Evolução da absorção de água por imersão dos concretos estudados



A Figura 35 mostra que a absorção de água dos concretos com baixo consumo de cimento foi inferior ao concreto de referência. O Concreto Ecológico A, foi o que menos absorveu água ao final do ensaio, tendo absorvido um total de 2,31% de água. O Concreto Ecológico B apresentou resultados muito próximos, com uma absorção de 2,54% de água. O concreto de referência absorveu 5,20% de água, uma diferença de 53% em relação aos concretos com baixo consumo de cimento, em média. Através de análise estatística pelo método ANOVA verificou-se que o comportamento dos concretos em relação à absorção por

imersão é diferente, ao comparar-se resultados de um concreto com outros demais. A análise é apresentada no Apêndice E.

Ao correlacionar a absorção de água por imersão com a relação a/finos observa-se que quanto maior essa relação, mais os concretos absorveram água, como representado no gráfico da Figura 36. A linha de tendência apresentou uma relação R^2 muito próximo a 1, o que indica boa correlação entre as variáveis avaliadas.



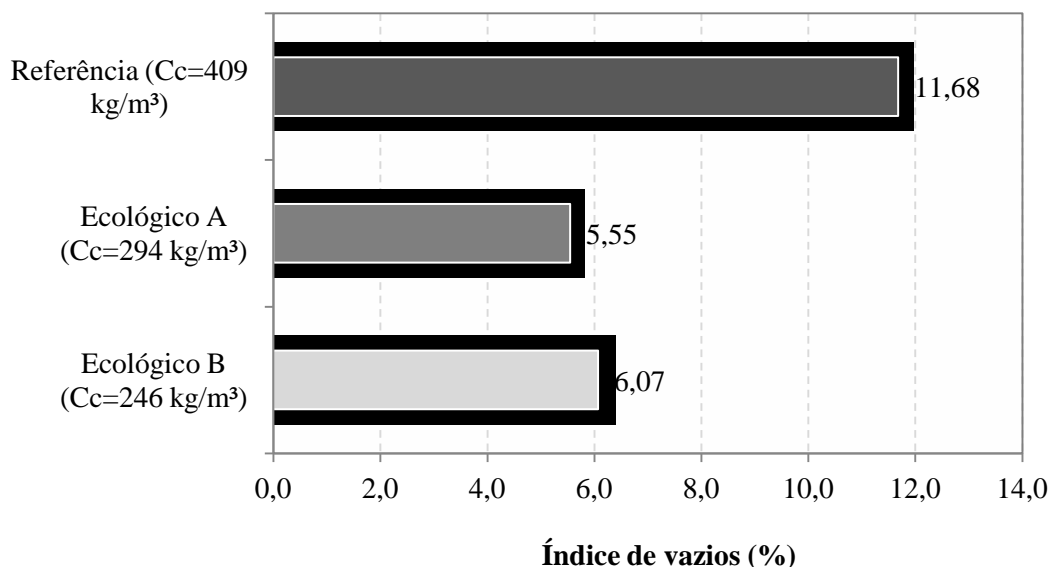
O bom desempenho dos concretos ecológicos pode ser atribuído à densificação que se obtém ao realizar o empacotamento de partículas dos materiais componentes, que resulta em caminhos de percolação da água mais longos e tortuosos. E, também, pelo refinamento dos poros causado pelas adições minerais e pelo menor teor de pasta por unidade de área de concreto.

Ao comparar os dois concretos com consumo reduzido de cimento constatou-se que o Concreto Ecológico A absorveu menos água que o Concreto Ecológico B, o que pode ser decorrente de uma porosidade reduzida pela menor relação água/finos que o primeiro possui. Uma hipótese é de que o maior consumo de cimento pode também ter colaborado para essa condição, com uma maior formação de produtos de hidratação.

Helene (1993) classifica um concreto como durável se este possuir uma absorção de água inferior a 4,2%, e como normal ao apresentar uma absorção entre 4,2 e 6,3%. Assim, ambos os concretos ecológicos estudados podem ser classificados como duráveis, e o concreto de referência, como concreto normal.

Conclusões semelhantes foram obtidas ao avaliar-se o índice de vazios calculado através dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão dos concretos em estudo (NBR 9778 ABNT, 1987), conforme mostra a Figura 37.

Figura 37 – Índice de vazios obtido por meio do ensaio de absorção de água por imersão

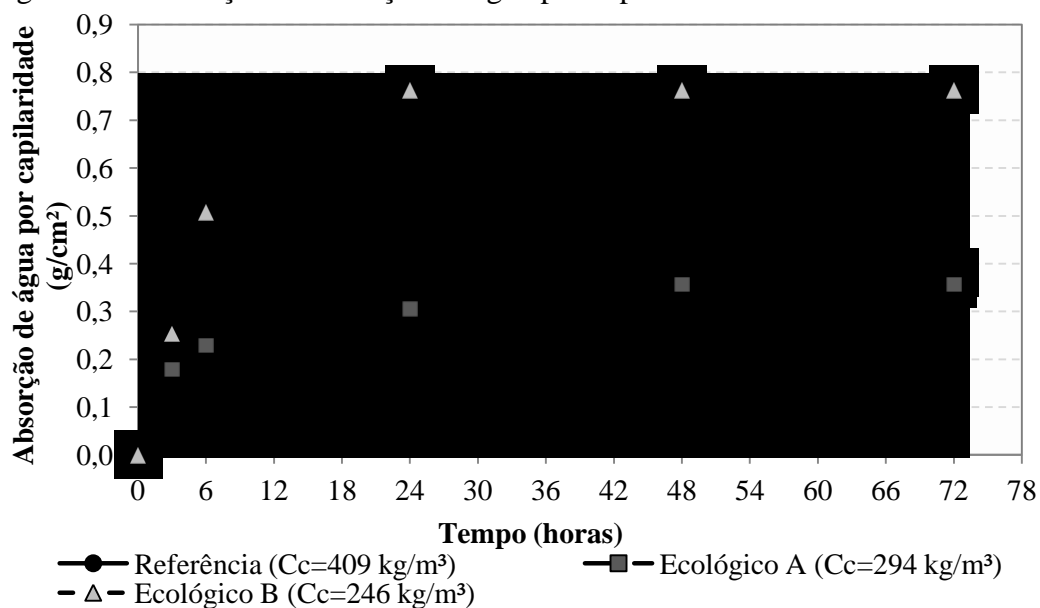


Observa-se através da Figura 37 que ambos os concretos ecológicos apresentaram um índice de vazios inferior a 10% sendo considerados de boa qualidade, conforme Helene (1993). Enquanto que o concreto de referência pode ser classificado apenas como de média qualidade (intervalo de 10 a 15%), segundo o mesmo autor.

b) Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado paralelamente ao ensaio de absorção de água por imersão, passando pelo mesmo procedimento de cura e secagem. Assim, o gráfico da Figura 38 mostra a evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos estudados com o passar do tempo.

Figura 38 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos estudados



Observa-se pela Figura 38 que, no caso do concreto Ecológico A, este absorveu menos água ao final das 72 horas de ensaio, em comparação aos demais concretos. De qualquer modo, a diferença obtida entre os resultados deste concreto e do concreto de referência é de apenas 5%. Por possuir uma quantidade de pasta inferior ao concreto de referência e presença de mais agregados, associado a um bom empacotamento, é possível aumentar a sinuosidade dos capilares dificultando a percolação da água. Além disso, o uso de aditivo superplastificante e a presença de adições minerais na mistura refinam os poros e tornam a matriz cimentante mais homogênea, densificando esta matriz. Isso diminui a absorção de água e faz com que o caminho a ser percorrido pela água no interior dos poros capilares do concreto seja mais longo.

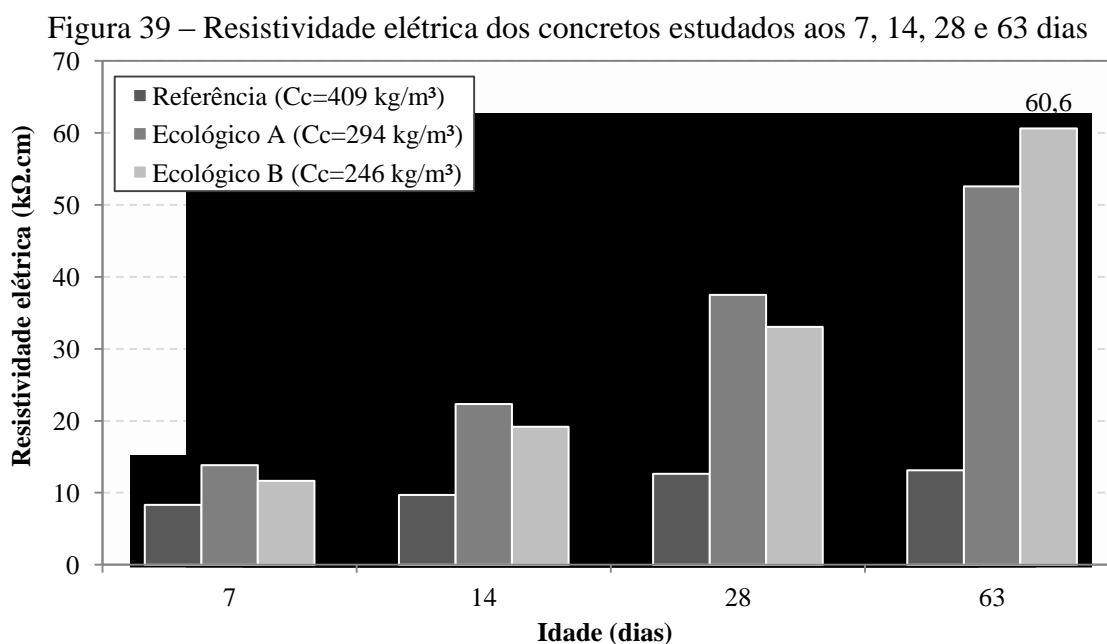
De qualquer modo, ao aplica-se o método ANOVA de análise de variância foi possível constatar que ambos os concretos de referência e o Concreto Ecológico A podem ser considerados estatisticamente iguais, quanto à absorção de água por capilaridade, com uma confiabilidade de 95%. A análise é apresentada no Apêndice E. Logo o traço do Concreto Ecológico A se mostrou tão eficiente em relação a diminuição da absorção capilar quanto o concreto de referência.

Ao comparar os dois ensaios de absorção verificou-se um comportamento diferente do Concreto Ecológico B, o qual absorveu menos água que o concreto de referência no ensaio de absorção de água por imersão, enquanto que no ensaio por capilaridade ocorreu o oposto, sendo o Concreto Ecológico B o que mais absorveu água. Isso pode ser justificado pelas

falhas de moldagem na base dos corpos de prova geradas pela dificuldade de adensamento verificadas.

c) Resistividade elétrica

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica dos concretos estudados nas idades de 7, 14, 28 e 63 dias seguem apresentados na Figura 39.



Whiting e Nagi (2003) apresentam valores que correlacionam a resistividade elétrica do concreto com a taxa de corrosão em armaduras em concreto armado. Os autores descrevem que resultados de resistividade inferiores a 5 kΩ.cm representam risco de corrosão muito alto; entre 5 e 10 kΩ.cm o risco é considerado alto; de 10 a 20 kΩ.cm moderado; e valores maiores que 20 kΩ.cm tem baixo risco de corrosão.

Dessa forma, observa-se pela Figura 39 que aos 28 dias ambos os concretos ecológicos apresentam resultados de resistividade elétrica superiores a 20 kΩ.cm, apresentando baixo risco de corrosão de armadura. Diferentemente do concreto de referência, que alcançou resistividade elétrica de 12,7 kΩ.cm aos 28 dias, que corresponde a um risco moderado.

Ao comparar os dois concretos ecológicos nota-se que até os 28 dias o Concreto A demonstrou resultados superiores ao Concreto Ecológico B. Porém, aos 63 dias, o ganho de resistividade do segundo foi de 45% em relação aos 28 dias atingindo 60,6 kΩ.cm, enquanto

que o primeiro aumentou 29% da resistividade e resultou em um valor igual a 52,6 kΩ.cm, sendo este valor 13% menor ao apresentado pelo Concreto Ecológico B.

Verifica-se que a relação a/finos dos concretos interfere na resistividade elétrica, por ser considerado um parâmetro controlador da estrutura porosa da matriz hidratada, bem como o índice de vazios do concreto. Os gráficos das Figura 40 e 41 demonstram que ao elevar a relação a/finos e o índice de vazios, o concreto tende a apresentar uma porosidade maior reduzindo a resistividade elétrica. A linha de tendência dos gráficos apresentou uma relação R^2 muito próximo a 1, o que indica boa correlação entre as variáveis avaliadas.

Figura 40 – Correlação entre relação a/finos e resistividade elétrica dos concretos estudados

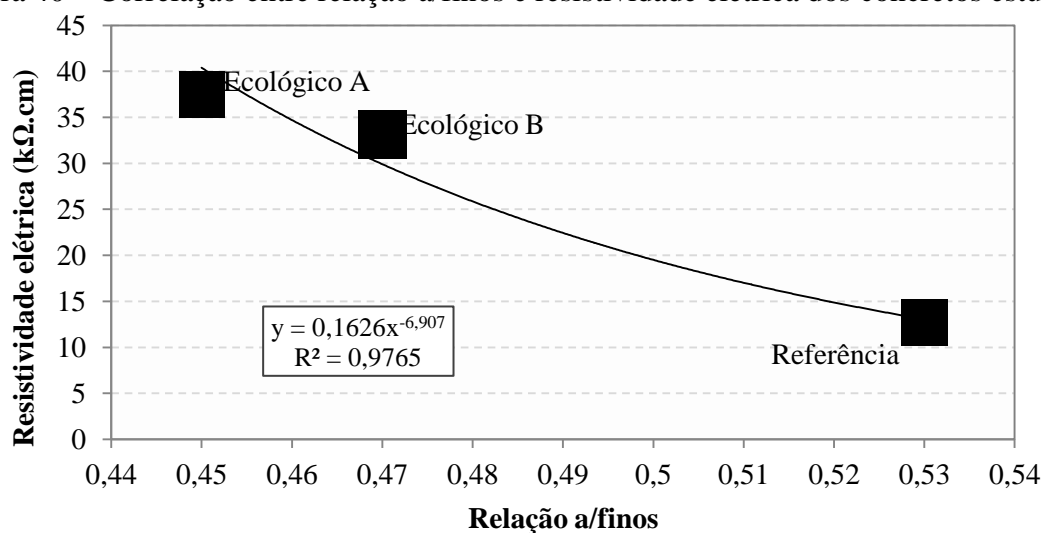
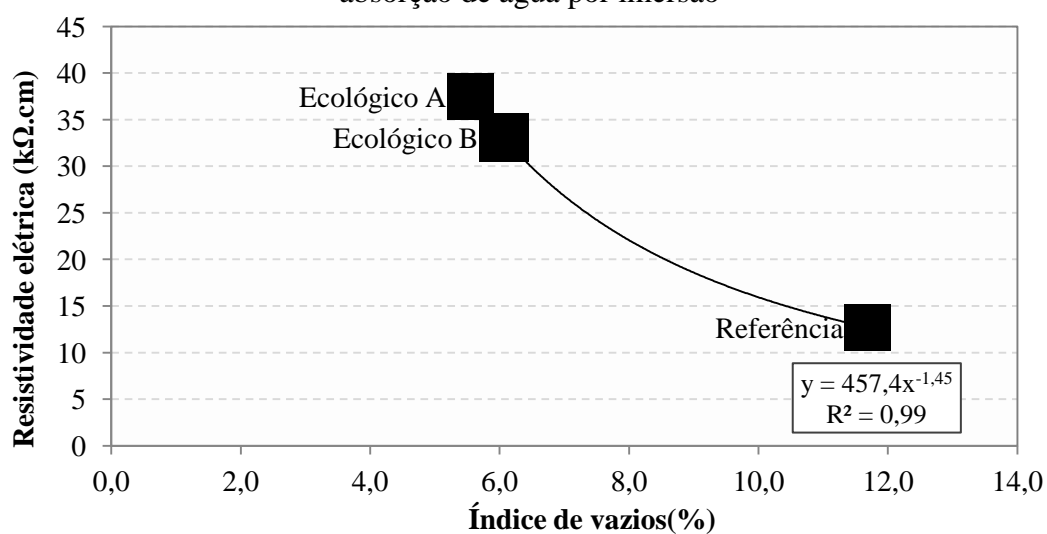


Figura 41 – Correlação entre resistividade elétrica e índice de vazios obtido por ensaio de absorção de água por imersão

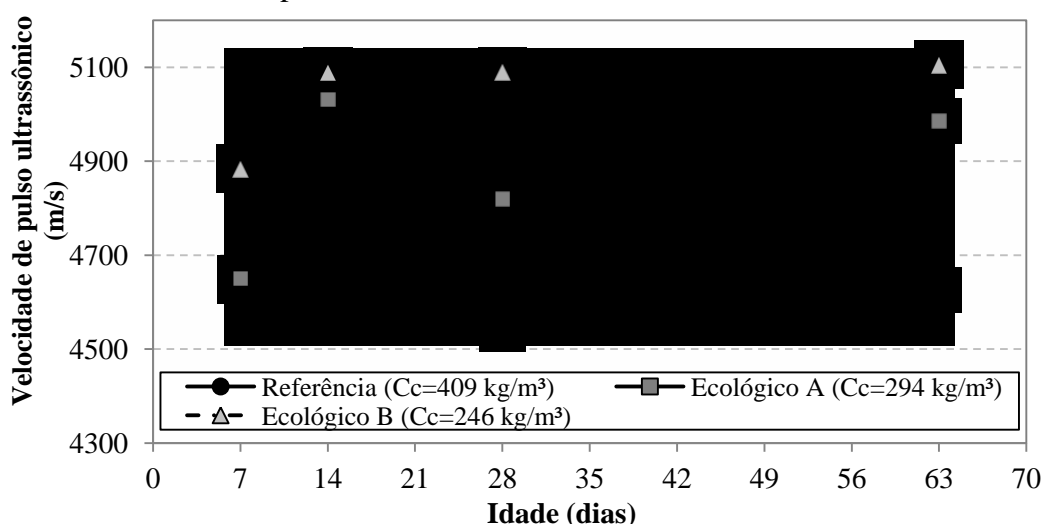


Além do efeito da relação a/finos , os concretos ecológicos contêm sílica de casca de arroz em sua composição, classificada como uma adição mineral pozolânica, que altera a microestrutura da matriz cimentícia, densificando-a, dificultando a condução de corrente elétrica pelo concreto e aumentando a sua resistividade elétrica.

d) Aplicação de ultrassom

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado aos 7, 14, 28 e 63 dias, e os resultados da média das velocidades obtidas encontram-se no gráfico da Figura 42. Todas as leituras foram feitas com os corpos de prova na condição saturada superfície seca.

Figura 42 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 7, 14, 28 e 63 dias dos concretos estudados

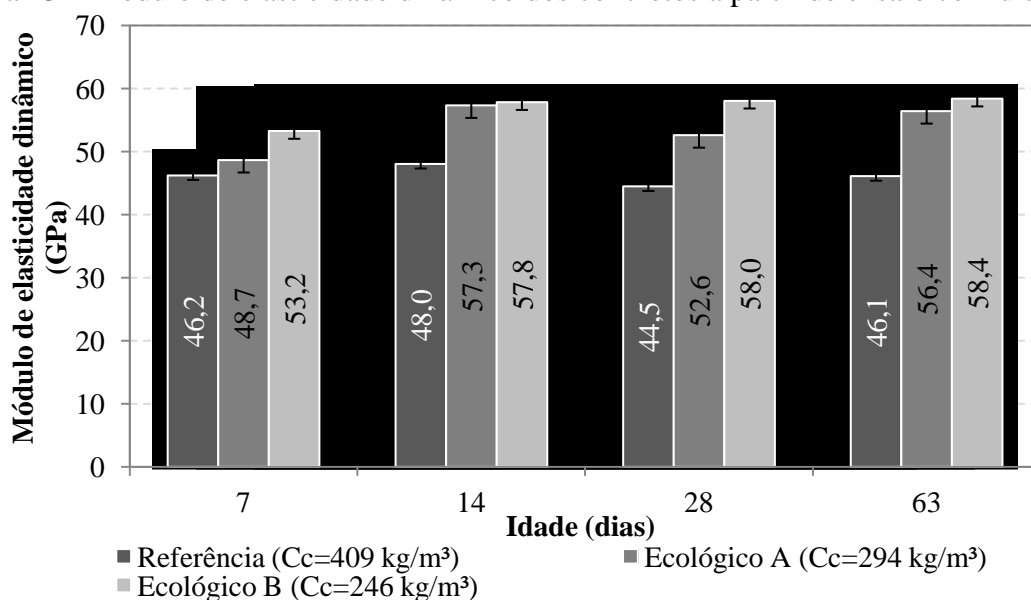


É possível constatar, pela Figura 42, que as velocidades de pulso ultrassônico foram superiores a 4500 m/s para todos os concretos, sendo estes então classificados com qualidade excelente, segundo relação estabelecida por Cánovas (1998). O concreto de referência foi o que apresentou as menores velocidades, seguido pelos concretos Ecológicos A e B. Quanto maior o volume de vazios no interior do concreto, menor é a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, pois a velocidade de propagação no ar é menor do que na pasta de cimento (HERNÁNDEZ *et al.*, 2000). Logo, o concreto de referência foi o que apresentou o maior índice de vazios, o que reforça os resultados obtidos pelo ensaio de absorção de água por imersão e justificando as menores velocidades.

Comparando os dois concretos ecológicos observa-se que, segundo esse ensaio, o Ecológico B apresenta velocidades de pulso ultrassônico maiores que o Ecológico A. Como o primeiro apresenta menos pasta e consequentemente mais agregados, a velocidade de propagação das ondas é maior, pelo fato dos agregados possuírem um módulo de elasticidade maior do que a pasta de cimento (CHUNG e LAW, 1983).

A partir dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico obtidos foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico de cada concreto para as referidas idades, conforme mostra a Figura 43. Para o cálculo considerou-se um coeficiente de Poisson igual a 0,2, e a massa específica no estado endurecido dos corpos de prova.

Figura 43 – Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos a partir de ensaio com ultrassom

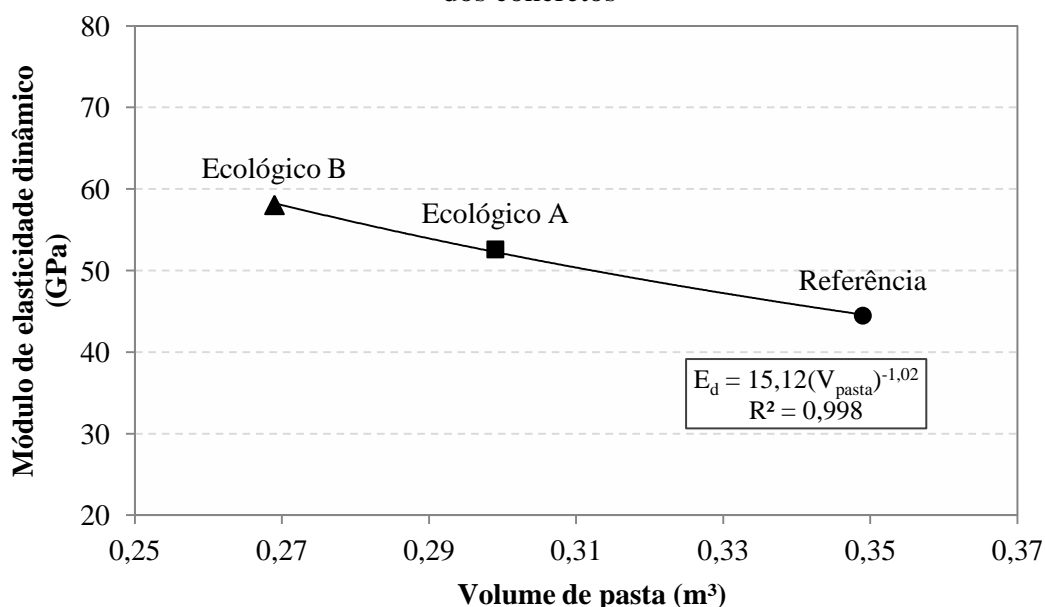


Ao analisar a Figura 43 observa-se que o Concreto Ecológico B atingiu os maiores valores de módulo de elasticidade dinâmico, alcançando 58,4 GPa aos 63 dias, resultado 3% e 27% superior ao Concreto Ecológico A e de referência, respectivamente. Ao aplicar análise com tabela ANOVA constatou-se que nas idades de 14 e 63 dias ambos os concretos ecológicos podem ser considerados estatisticamente equivalentes. Logo, pode-se concluir que esses concretos apresentaram mais rigidez do que o concreto de referência, ou seja, menor é a capacidade de deformação. Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que os concretos ecológicos apresentam menos vazios que o de referência e mais agregados por possuírem menos pasta, devido ao empacotamento dos materiais realizado.

O gráfico da Figura 44 demonstra a correlação entre o módulo de elasticidade e o volume de pasta dos concretos produzidos. Nota-se que ao elevar o volume de pasta, o valor

do módulo tende a diminuir. A linha de tendência do gráfico apresentou uma relação R^2 muito próximo a 1, o que indica boa correlação entre as variáveis avaliadas.

Figura 44 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e volume de pasta dos concretos



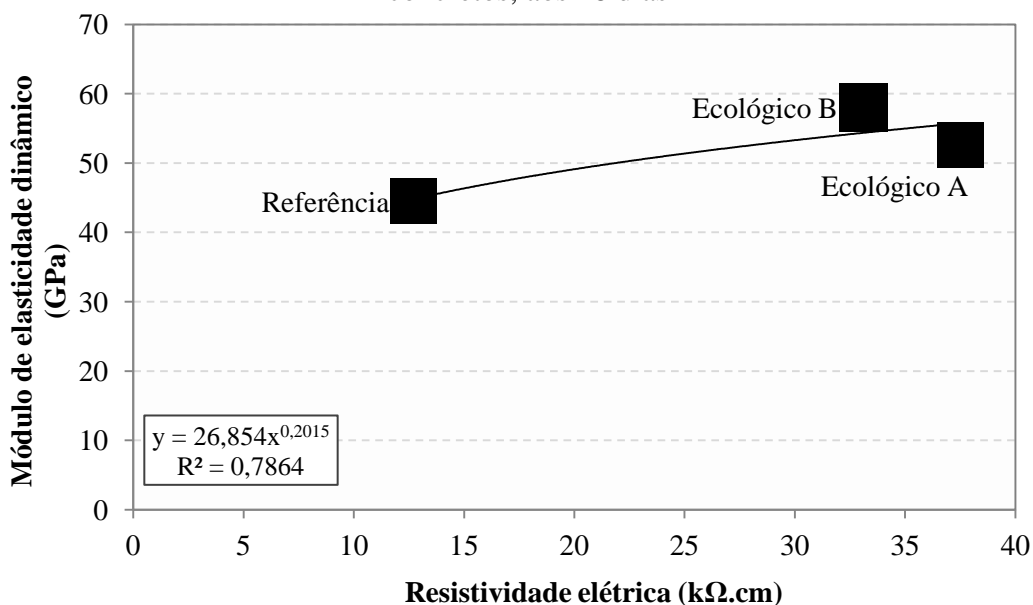
Ademais, o resultado de velocidade de pulso ultrassônico atesta que o Concreto Ecológico B possui menos vazios que o Ecológico A. Contudo, a análise do resultado de índice de vazios, pelo ensaio de absorção de água por imersão, demonstrou o oposto, ou seja, que o Concreto Ecológico A possui menos vazios que o Ecológico B. Uma justificativa para essa discrepância pode estar relacionada ao fato de que as leituras realizadas nos corpos de prova do Concreto Ecológico B foram mais precisas, devido à superfície do topo das amostras apresentarem maior regularidade, proporcionando um contato da sonda com o concreto melhor. Como a produção desse concreto foi feita após os de referência e Ecológico A, o cuidado para que o topo do corpo de prova ficasse o mais plano possível foi maior. Esse argumento também pode ser considerado plausível para justificar a queda nos resultados aos 28 dias para os concretos de referência e Ecológico A (Figura 42).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta um valor para módulo de elasticidade relacionado com a classe de concreto, nesse caso uma classe C25 possui módulo de elasticidade estático, aos 28 dias, de 28 GPa. Ao comparar os resultados experimentais aos 28 dias com o valor indicado pela norma, foi possível notar que a diferença entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico foi de 42%, em média, para ambos os concretos de referência e Ecológico A. Isso vem ao encontro com o exposto por Haach *et al.* (2015), os quais

argumentam que a diferença entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto é de 40%, em média. Para o Concreto Ecológico B a diferença foi de 52%, o que pode ser atribuído à menor quantidade de pasta desse concreto e às melhores condições de leitura dos corpos de prova, já citados anteriormente.

Finalmente, é possível correlacionar os resultados de resistividade elétrica com os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos com o ensaio de ultrassom. Assim, no gráfico da Figura 45 está demonstrada essa correlação, a qual permite observar que quanto maior a resistividade dos concretos estudados, maior foi o módulo de elasticidade dinâmico. Isso, pois, assim como a resistividade elétrica, o ensaio de ultrassom, utilizado para determinar o módulo, está relacionado com a qualidade dos concretos. Em ambos os ensaios, a quantidade de vazios interfere nos resultados, por ser considerado um parâmetro influente na estrutura de poros do concreto. Logo, observou-se o mesmo comportamento dos concretos de referência e ecológicos para os ensaios realizados.

Figura 45 – Correlação entre resistividade elétrica e módulo de elasticidade dinâmico dos concretos, aos 28 dias



4.4.4 Análise de custos

Com a finalidade de verificar a viabilidade econômica da produção dos concretos ecológicos propostos neste trabalho, realizou-se uma breve avaliação de custos de produção destes concretos.

Na Tabela 28 segue o custo unitário de cada material, o custo total e o custo relativo, o qual se relaciona com a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.

Tabela 28 – Custos dos materiais envolvidos na produção dos concretos produzidos

Material	Custo unitário (R\$/kg)	Concretos desenvolvidos					
		Referência		Ecológico A		Ecológico B	
		Consumo (kg/m³)	Custo total (R\$/m³ concreto)	Consumo (kg/m³)	Custo total (R\$/m³ concreto)	Consumo (kg/m³)	Custo total (R\$/m³ concreto)
Cimento	0,50	409,54	204,77	294,04	147,02	246,21	123,11
Sílica de casca de arroz	1,84	-	-	24,43	44,95	24,43	44,95
Pó de quartzo	0,88	-	-	58,81	51,99	58,81	51,99
Brita 1	0,028	1037,71	28,92	546,42	15,23	546,42	15,23
Brita 0	0,024	-	-	859,54	20,63	859,54	20,63
Areia	0,028	753,88	21,12	547,49	15,34	547,49	15,34
Aditivo	12,81	-	-	3,02	38,67	1,32	16,88
Total (R\$/m³)		254,81		333,82		288,12	
Resistência à compressão (MPa)		35,2		54,1		31,0	
Custo relativo (R\$/m³.MPa)		7,24		6,17		9,29	

Ao comparar os custos apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, nota-se que, de uma forma geral, os custos totais obtidos para os concretos ecológicos foram superiores ao de referência. Pela análise da economia de cimento, nota-se que esta foi de aproximadamente R\$ 58,00 para o Concreto Ecológico A e R\$ 82,00 para o Ecológico B. Sendo a economia total equivalente a R\$ 77,00 e R\$ 101,00 para os Concretos Ecológicos A e B, respectivamente, considerando as reduções obtidas para o cimento, brita 1 e areia. Isso contribui para as questões ambientais que envolvem o consumo de cimento e que foram discutidas no decorrer desse trabalho. Ademais, o acréscimo da brita 0 não impactou nos custos totais, uma vez que a economia de cimento dos concretos ecológicos foi maior que o valor acrescido pela brita 0.

Por outro lado, observou-se um aumento no custo total dos concretos ecológicos promovido pelas duas adições minerais e pelo aditivo superplastificante, os quais representam cerca de 40% do custo total. As duas adições custaram aproximadamente R\$ 97,00, representando cerca de duas vezes a economia de cimento obtida no Concreto Ecológico A, e se mostrando um valor muito próximo da economia de cimento para o Ecológico B.

Outra análise pertinente é em relação ao custo relativo. Mesmo que o custo total dos materiais para produzir o concreto Ecológico A seja maior, ele apresentou um custo relativo

de R\$ 6,17 por m³ de concreto por MPa, 15% inferior ao concreto de referência, que alcançou um valor de R\$ 7,24 por m³ de concreto por MPa. Porém, é necessário que para um aproveitamento integral dessa vantagem, o projetista da estrutura usufrua por completo o desempenho mecânico obtido.

Comenta-se ainda que as condições de aplicação dos concretos também influenciam diretamente na análise de custo. Em casos onde se necessite baixo calor de hidratação, como por exemplo para a execução de peças com grande volume de concreto, a utilização de um material com menos cimento, como os concretos ecológicos desenvolvidos, pode se tornar atrativa.

Por fim, salienta-se que esses valores são indicativos, podendo as conclusões variarem com base nos custos de cada material em diferentes regiões do país. Acredita-se na possibilidade de reduzir o custo total dos concretos ecológicos substituindo os itens mais caros como as adições minerais e o superplastificante por materiais mais econômicos e de equivalente eficiência. Em todo caso, é necessário uma análise mais completa envolvendo estudos de campo que avaliem os custos relacionados aos equipamentos necessários para lançamento e adensamento, por exemplo, e mão de obra para produção e aplicação dos concretos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais dos estudos realizados.

Através do estudo de agregados foi possível verificar o comportamento dos modelos de otimização de curvas granulométricas. O modelo que apresentou maior densidade de empacotamento, através de avaliação com a areia normal do IPT e modelo CPM (DE LARRARD, 1999), foi o de Funk e Dinger (1980).

Este modelo foi utilizado para otimizar os agregados que compuseram os concretos produzidos (areia, brita 1 e brita 0), os quais inicialmente foram peneirados e separados em 10 frações. Porém, esse procedimento demanda tempo e uma quantidade maior de material, tornando-se inviável. Assim, buscou-se qual a proporção entre os três agregados, que apresentasse densidade de empacotamento equivalente à curva com 10 classes de grãos otimizada por Funk e Dinger (1980).

Observou-se que as proporções aleatórias estudadas, compostas pelos três agregados, produziram densidades de empacotamento elevadas, sem seguir um modelo específico. Isso limita o seu uso a processos empíricos de tentativa e erro, dificultando sua aplicação. Por fim, o cálculo da densidade de empacotamento feito ao considerar cada agregado como uma classe única de tamanho de grãos está passível de erros, pois representa-se uma amplitude grande de tamanho de grãos em cada classe de agregado por um único diâmetro. Por essa razão, a verificação experimental destes resultados teóricos é de grande importância para validação da prática realizada.

Através de procedimento experimental foi possível obter uma proporção ideal entre as duas britas e a areia. Essa proporção foi utilizada para iniciar o processo de determinação dos traços ecológicos, porém devido à previsão da resistência pelo modelo de Fennis (2011) e Fennis *et al.*, (2013b) ser muito distante do desejado, optou-se por modificar essa proporção conforme os ciclos de dosagem iam sendo executados. Assim, foram aplicadas as proporções de agregados aleatórias para determinação dos traços.

Durante esse estudo notou-se diferenças entre densidades de empacotamento experimentais e teóricas. Essas divergências foram consideradas aceitáveis, devido às restrições dos modelos CPM e CIPM, os quais foram elaborados a partir de dados experimentais de um determinado conjunto de materiais. Ao se usar outros materiais na campanha experimental, então, diferenças são naturalmente observadas.

Com relação ao estudo de materiais finos verificou-se inicialmente, através do uso do método experimental de Wong e Kwan (2008) para a determinação da densidade de empacotamento na condição úmida, que a densidade de empacotamento do cimento foi maior do que a do pó de quartzo e da sílica de casca de arroz. Desse modo, constatou-se que nesse estudo, quanto mais fino o material, maior a influência das forças de atração entre as partículas e maior o efeito da aglomeração (MOOSBERG-BUSTNES *et al.*, 2004; FENNIS *et al.*, 2013b). Assim, a densidade de empacotamento inferior do pó de quartzo e da sílica de casca de arroz pode ser atribuída à maior formação de aglomerados, que apresentam elevado volume de vazios em seu interior e podem atuar afastando as partículas de maior tamanho.

A sílica de casca de arroz, em particular, necessitou de mais água para a formação de uma pasta homogênea do que o cimento e o pó de quartzo. A sílica por ser mais fina que os outros dois materiais e possuir maior superfície específica, necessita de mais água para envolver suas partículas. Por conseguinte, essa adição sofre maior aglomeração que os outros materiais, de modo que uma maior quantidade de água fica aprisionada entre os aglomerados formados.

Analiticamente, pela aplicação do CIPM de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013a) foi possível obter uma proporção ideal entre os materiais finos, a qual foi escolhida para a produção do concreto ecológico.

A determinação dos traços dos concretos ecológicos foi feita a partir do traço do concreto de referência, dosado pelo método do IPT/EPUSP. A aplicação do método de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b) permitiu reduzir o consumo de cimento em até 163 kg/m³.

A redução do consumo de cimento durante a determinação dos traços dos concretos ecológicos foi feita em duas etapas, sendo a primeira a otimização dos agregados. Notou-se que ao inserir a brita 0 para compor o esqueleto granular, a densidade de empacotamento da composição aumentou, devido à uma maior variedade de grãos para preencher os espaços entre as partículas maiores.

A segunda etapa compreendeu na otimização da pasta, sendo realizada a substituição do cimento por pó de quartzo e sílica de casca de arroz utilizando a proporção ideal obtida entre os três materiais. Reduziu-se o volume total de finos verificando em cada etapa do ciclo de dosagem a resistência prevista. A mistura escolhida para compor o concreto ecológico foi a tentativa que apresentou previsão de resistência à compressão mais próxima do valor desejado. A partir dessa composição foi possível determinar dois traços ecológicos.

A tentativa de manter a relação a/c constante, durante a determinação de um dos traços ecológicos, acarretou na alteração da proporção entre os finos, uma vez que o parâmetro

utilizado para analisar as diferentes composições simuladas foi a resistência à compressão prevista. Sendo assim, para se obter um traço ecológico com relação a/c constante, o critério de escolha deve ser baseado exclusivamente nessa relação.

Ambos os concretos ecológicos apresentaram problemas de consistência demonstrando que a relação ϕ_{mix}/ϕ , mantida igual a 0,95 não resultou em um concreto plástico com *slump* variando entre 100 e 150 mm. Para alcançar essa condição, foi necessário acrescentar aditivo superplastificante nos concretos ecológicos. A substituição do cimento por fillers pode levar a uma perda da consistência deixando o concreto mais seco, devido a fatores como o tamanho, área superficial, forma e porosidade das partículas (MOOSBERG-BUSTNES *et al.*, 2004).

No caso do concreto de referência, não foi previsto o uso de aditivo durante sua dosagem e produção. O aditivo influencia as propriedades mecânicas dos concretos, sendo assim, a sua ausência no concreto de referência pode ter causado divergências durante as comparações de resultados. O uso do aditivo nesse concreto poderia ter reduzido o consumo de cimento durante sua dosagem, porém optou-se por produzir um concreto convencional sem o uso de adições e de aditivos químicos.

É importante ressaltar que ambos os concretos ecológicos apresentaram elevada coesão na pasta, após ajuste da consistência com o aditivo, porém demonstraram ausência de argamassa causando o desmoronamento da parte superior do cone de concreto no ensaio de *slump test*. Esse comportamento coesivo da pasta está relacionado ao empacotamento das partículas finas que promove a redução dos vazios entre os grãos deixando o concreto mais denso.

Caso os concretos ecológicos fossem aplicados em obras convencionais poderiam ser verificadas dificuldades durante o lançamento e o adensamento, devido às condições observadas no estado fresco. A aplicação dos concretos em centrais de pré-moldados se mostraria mais vantajosa, pela capacidade de utilização de formas vibratórias e facilidade de lançamento e transporte do concreto.

Os ensaios mecânicos mostraram a possibilidade de dosar um concreto com consumo de cimento reduzido, através de técnicas de empacotamento de partículas, que se comporte mecanicamente semelhante a um concreto convencional. O concreto com o menor consumo de cimento foi o que mais se aproximou da resistência desejada aos 28 dias, alcançando 31,0 MPa. Considera-se que esse concreto atingiu resultados positivos, uma vez que a resistência atingida o classifica como concreto estrutural (NBR 6118 ABNT, 2014) e cumpre com as previsões e objetivos estabelecidos.

Verificaram-se diferenças entre as resistências à compressão previstas pelo método de dosagem e os resultados experimentais. O cálculo para prever a resistência está baseado no fator de espaçamento do cimento, o qual considera o espaço necessário para a formação dos produtos de hidratação e a quantidade de água da mistura. Contudo, existem outros fatores que interferem na resistência à compressão do concreto, como as condições de produção e os materiais utilizados nessa pesquisa, os quais podem diferir dos materiais utilizados pelos autores do método.

Os ensaios de durabilidade relacionados à absorção de água por imersão, resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico indicaram baixa porosidade dos concretos ecológicos, inferiores ao concreto de referência. O bom desempenho dos concretos ecológicos pode ser atribuído à densificação que se obtém ao realizar o empacotamento de partículas dos materiais componentes e, também, pelo refinamento dos poros causado pelas adições minerais. Em relação aos resultados de resistividade elétrica aos 28 dias, ambos os concretos ecológicos apresentaram baixo risco de corrosão de armadura, enquanto o de referência apresentou um risco moderado. Para o ensaio de velocidade de pulso por ultrassom todos os concretos foram então classificados com qualidade excelente. Através deste último, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos, os quais atingiram os resultados esperados.

O ensaio de absorção de água por capilaridade evidenciou um bom comportamento do concreto Ecológico A em relação ao concreto de referência. Isso pode ser justificado pelo fato desse concreto possuir uma quantidade de pasta inferior e presença de mais agregados diminuindo a absorção de água, e fazendo com que o caminho a ser percorrido pela água no interior dos poros capilares do concreto seja mais longo. Em contrapartida, o concreto Ecológico B absorveu, em média, 50% mais água por capilaridade do que os outros dois concretos. Isso pode ser justificado pela sua composição, que favorece a conexão dos poros em seu interior por apresentar menor consumo de cimento e pasta, e pela falta de argamassa observada no estado fresco. E também pelo fato de que a face inferior dos corpos de prova apresentou falhas de moldagem, devido à dificuldade de adensamento pelo empacotamento elevado do esqueleto granular.

Ao comparar os custos dos concretos observou-se que ambos os concretos ecológicos apresentaram economia de cimento, pela redução do consumo. Por outro lado, as adições minerais e o aditivo superplastificante foram responsáveis pela elevação do custo final, encarecendo os concretos ecológicos. Acredita-se na possibilidade de reduzir o custo total dos concretos ecológicos substituindo os itens mais caros como as adições minerais e o

superplastificante por materiais mais econômicos e de equivalente eficiência. Em todo caso, é necessário uma análise mais completa envolvendo estudos de campo que avaliem os custos relacionados aos equipamentos necessários para lançamento e adensamento, por exemplo, e mão de obra para produção e aplicação dos concretos.

Finalmente, o principal objetivo proposto neste trabalho foi alcançado, em se tratando da possibilidade de utilizar um método de dosagem baseado em técnicas de empacotamento de partículas para dosar, produzir e avaliar as propriedades de um concreto ecológico. O consumo de cimento Portland foi reduzido por consequência da aplicação do método de Fennis (2011) e Fennis *et al* (2013b), sendo substituído por duas adições minerais (sílica de casca de arroz e pó de quartzo). O esqueleto granular também foi modificado. Para a aplicação dos concretos desenvolvidos é importante que sejam feitos ajustes a fim de suprimir os problemas encontrados no estado fresco. Além disso, são necessários mais estudos de durabilidade para avaliar fenômenos de carbonatação e penetração de cloretos, por exemplo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de um concreto ecológico, ou seja, com consumo reduzido de cimento, têm bom potencial de aplicação tendo em vista todas as vantagens relacionadas ao seu uso. É necessário, porém, o aprofundamento na pesquisa para avaliar o seu comportamento por completo adequando-o para a aplicação em obras. Assim, são feitas algumas sugestões para o prosseguimento da pesquisa:

- Avaliação dos parâmetros reológicos de concretos ecológicos, por estes apresentarem dificuldades no manejo, relacionando a reologia com o empacotamento de partículas;
- Aprofundamento da avaliação da durabilidade com a inclusão de outros ensaios, como, por exemplo, carbonatação, penetração de cloretos, resistência a sulfato e porosimetria por intrusão de mercúrio;
- Estudo semelhante porém com enfoque na otimização do custo de produção, buscando aditivos, adições e filers que possuam melhor relação custo benefício, visando reduzir o custo total por m³ do concreto e considerando também a aplicação em condições reais de obras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5735*: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro. 1991. 6p.

_____. *NBR 5736*: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro. 1991. 5p.

_____. *NBR 5738*: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015. 9p.

_____. *NBR 5739*: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007. 9p.

_____. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro. 2014. 238p.

_____. *NBR 7211*: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2009. 9p.

_____. *NBR 7214*: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro. 2012. 4p.

_____. *NBR 7222*: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011. 5p.

_____. *NBR 7809*: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2008. 3p.

_____. *NBR 8802*: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro. 2013. 8p.

_____. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 1987. 4p.

_____. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro. 1995. 3p.

_____. *NBR 9833*: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro. 2008. 3p.

_____. *NBR 11578*: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro. 1999. 5p.

_____. *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro. 2015. 23p.

_____. *NBR NM 30*: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001. 3p.

_____. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro. 2006. 8p.

_____. *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

_____. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro. 2009. 6p.

_____. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro. 2009. 8p.

_____. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro. 1998. 8p.

_____. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ALEXANDER, M.; MINDESS, S. *Aggregates in concrete*, Taylor & Francis, New York, 2005.

AMERICAN, SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM C-597.4p. West Conshohocken, 2009.

_____. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM C-1202.7p. West Conshohocken, 2012.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity. In: *International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, RILLEM, p. 1-8, 2004.

ANDREASEN, A.H.M. ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produktauslosen Körnern (miteinigen Experimenten). *Colloid & Polymer Science*, Vol. 50 (3), pp. 217-228. 1930.

ANTIOHOS, S.K.; PAPADAKIS, V.G.; TSIMAS, S. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, v. 61-62, p. 20-27, 2014.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (editor). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed., v. 1. São Paulo, IBRACON, 2011

BASF. *Master Glenium 51 (Ficha técnica de produto)*. Disponível em: <<http://goo.gl/uHrW94>>. Acesso em: jun. 2015.

BENTZ, P.; AITCIN, P.; The hidden meaning of water-cement ratio. *Concrete International*, mai/2008.

CÁNOVAS, M.F. *Patologia e terapia do concreto armado*. São Paulo, Ed. PINI, 1998. 522 p.

CASCUDO, O. *O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto*, Inspeção e técnicas eletroquímicas – editora UFG, Goiânia, 1997.

CASTRO, A. *A influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2003.

CAVALCANTI, R. S. *Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2010. 165 p.

CHEN, C.; CHANG, J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*. n. 71, p. 35-43. 2014.

CHUNG, H.W.; LAW, K.S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique, *Concrete International*, out., p.42-49, 1983.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (editor). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed., v. 1. São Paulo, IBRACON, 2011.

DAMINELLI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN, V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 555-562, 2010.

DE LARRARD, F. *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. Modern Concrete Technology Series, v. 9. E&FN SPON, London, 1999.

_____. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. In: 3 RILEM International Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete, France, v. 1. 2011.

DE LARRARD, F. de; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 6, p. 997-1009. 1994.

DHIR, R.K.; MCCARTHY, M.J.; PAINE, K.A. Engineering property and structural design relationships for new and developing concretes. *Materials and Structures*, v. 38, p. 1-9, 2005.

ELRAHMAN, M. A.; HILLEMEIER, B. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. *Construction and Building Materials*, v. 58, p. 225-233. 2014.

EVANGELISTA, A. C. J. *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Rio de Janeiro, 2002. 219p.

FENNIS, S.A.A.M. Measuring water demand or packing density of micro powders – comparison of methods. *Civil Engineering and Geosciences*. Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2008.

_____. *Design of ecological concrete by particle packing optimization*. Tese Doutorado – Technische Universiteit Delft, Amersfoort, Holanda, 2011.

FENNIS, S.A.A.M.; WALRAVEN, J.C.; DEN UIJL, J.A. Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. *Materials and Structures*, v. 46, p. 463-478, 2013a.

_____. Defined-performance design of ecological concrete. *Materials and Structures*, v. 46, p. 639-650, 2013b.

FIGUEIREDO, E.P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G.C. (ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Cap. 27, p. 829-855. São Paulo: IBRACON, 2005.

FORMAGINI, S. *Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Rio de Janeiro, 2005. 259 p.

FUNK, J.E.; DINGER, D.R. *Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content*. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO). New York. 1980.

GAJDA, J.; ALSAMSAM, E. *Engineering Mass Concrete Structures*. Skokie/USA: Portland Cement Association. (Professional Development Series), p.7. 2006.

GOBBI, A. *Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

HAACH, V. G.; JULIANI, L. M.; DA ROZ, M. R. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concrete produces with high early strength cement. *Construction and Building Materials*. v. 96, p. 1-10. 2015.

HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo de corrosão de armaduras de concreto armado*. Tese de Livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993.

_____. Dosagem do concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (editor). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Cap. 15, p.439-472. São Paulo, IBRACON, 2005.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. Ed. Pini: São Paulo, 1992.

HERMANN, A.; LANGARO, E.A.; LOPES DA SILVA, S.H.; KLEIN, N.S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.

HERNÁNDEZ, M. G.; IZQUIERDO, M. A. G.; IBÁÑEZ, A.; ANAYA, J. J.; ULLATE, L. G. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. *Ultrasonics*. v. 38, p. 531-533. 2000.

HOPPE, T. F. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.

HOPPE FILHO, J. *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008. 247p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agrícola de 2015*. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em: junho de 2015.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Tracking Clean Energy Progress 2015*. Paris/France: International Energy Agency, 98p, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The physical science basis*. Suíça, 2013.

ISMAIL, M.S.; WALIUDDIN, A.M. Effect of Rice husk ash on high strength concrete. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 7, p. 521-526, 1996.

JUNIOR, L.A.M.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Resistência à compressão e carbonatação natural em protótipos de concreto estrutural com cinza de casca de arroz. In: 52 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 52CBC2010, 2010, Fortaleza. *Anais...52 Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza. IBRACON. 2010.

KLEIN, N. S. El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland. Tese Doutorado – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2012.

KULAKOWSKI, M. P.; *Contribuição ao estudo de carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*. v. 53, n. 2, p. 91-100. 2001

KWAN, A.K.H.; CHAN, K.W.; WONG, V.A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. *Powder Technology*, v. 237, p. 172-179, 2013.

LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 10, p. 1481-1488. 1997.

LI, L.G.; KWAN, A.K.H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. *Powder Technology*. v. 253, p. 514-521, 2014.

LOHTIA, R.P.; JOSHI, R.C. Mineral Admixtures. In: RAMACHANDRAN, V.S. (editor). *Concrete admixtures handbook*. 2. ed., v. 1. New Jersey, NOYES PUBLICATION, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 3. ed. McGraw-Hill, 2008.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, p. 601-605, 2009.

MOINI, M.; FLORES-VIVIAN, I.; AMIRJANOV, A.; SOBOLEV, K. The optimization of aggregate blends for sustainable low cement. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 627-634, 2015.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FOSSBERG, E. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures*, v. 37, p. 74-81, 2004.

MORRIS, W.; VICO, A.; VAZQUEZ, M.; SANCHEZ, S.R. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. *Corrosion Science*. N. 44, p. 81-99. 2002.

MÜLLER, N.; HARNISCH, J.A *blue print for a climate friendly cement industry*. Gland/Switzerland: WWF International, 16p. 2008.

OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. *Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico*, Fazenda Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000).

PAPADAKIS, V. G.; Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 79-86. 2000.

PEREIRA, T. A. C.; LIBORIO, J. B. L. Técnicas de empacotamento de partículas para obtenção de CAD.In: 51 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 51CBC2009, 2009, Curitiba. *Anais...51 Congresso Brasileiro do Concreto*. Curitiba. IBRACON. 2009.

POLDER, R. B. Test method for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*. v. 15, p. 125-131, 2001.

REBMANN, M. S.; TRIGO, A. P. M.; LIBÓRIO, J. B. L. Melhorando as características mecânicas e microestruturais de concretos com cimento CII-Z através de métodos de empacotamento e de dispersão de partículas In: 52 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 52CBC2010, 2010, Fortaleza. *Anais...52 Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza. IBRACON. 2010.

REBMANN, M. S. *Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2011.

RECENA, F. A. P. *Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

REDDY, D. V.; ALVAREZ, M. Marine Durability Characteristics of Rice Husk Ash-Modified Reinforced Concrete. In: Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2006). *Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice*. Mayagüez, Puerto Rico, 2006.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.T. *Projeto de Experimentos*. Série Monográfica Qualidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ROHDEN, A.B. *Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; CUSSIGH, F. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Construction and Building Materials*, França, v. 23, p 190-199. Jan. 2008.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil), Universidade de Brasília. Brasília, DF, 161p. 2006.

SEIDLER, N.; DAL MOLIN, D. C. Influência das adições minerais e da resistência a compressão na carbonatação dos concretos. In: 48 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 48CBC2006, 2006, Rio de Janeiro. *Anais...48 Congresso Brasileiro do Concreto*. Rio de Janeiro. IBRACON. 2006.

SENSALE, G.R. Strength development of concrete with rice-huskash. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, p. 158-160, 2006.

SILICA VERDE DO ARROZ LTDA, *Silica de casca de arroz (Ficha técnica de produto)*. Disponível em: <<http://goo.gl/AESgbH>>. Acesso em: jun. 2015.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEEZAS, T. C. Relações entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: alta alumina. In *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 47º, João Pessoa-PB, 2003. *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2003.

SILVA, T. J.; FERREIRA, G.; DIAS, J. F. Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. *Ciência e Engenharia*, v. 22 (1), p. 103-113, jan./jun. 2013.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. *Relatório Anual 2013*. Rio de Janeiro: SNIC, 40p. 2013.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 1990. 475p.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (editor) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Cap. 36. São Paulo, IBRACON, 2011.

UCHOA, S.B.B.; TONHOLO, J.; FEITOSA, T.; LIMA, F.B. Determinação da penetração de cloretos em concretos sem e com adições minerais. In: 51 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 51CBC2009, 2009, Curitiba. *Anais...51 Congresso Brasileiro do Concreto*. Curitiba. IBRACON. 2009.

VAGHETTI, M. A. O. *Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento portland*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 1999.

_____. *Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

VAN DEN HEEDDE, P.; DE BELIE, N. Enviromental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, p. 431-442, 2012.

VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

WADA, I.; KAWANO, T.; KAWAKAMI, M.; MAEDA, N. Effect of highly reactive rice husk ash on durability of concrete and mortar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 5. Barcelona, 2000. *Proceedings*. Espanha, CANMET/ACI, p.205-22, 2000.

WASSERMANN, R. KATZ, A. BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? *Materials and Structures*. N. 42, p. 973-982. 2009.

WHITING, D.A.; NAGI, M. A. E. *Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review*. Skokie/USA, Portland Cement Association, 57 p. 2003.

WONG, H. H. C. KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: Part 1 - measurement using a wet packing method. *Materials and Structures*. n. 41, p 689–701. 2008.

YIGITER, H.; AYDIN, S.; YAZICI, H.; YARDIMCI, M. Y. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). *Composites: Part B*. n. 43, p. 2907-2914. 2012.

YU, A.B.; FENG, C.L.; ZOU, R.P.; YANG, R.Y. On the relationship between porosity and interparticle. *Powder Technology*, v. 130, p. 70-76, 2003.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CPM

A fim de propor uma melhor compreensão do procedimento de cálculo referente ao modelo CPM, de De Larrard (1999), apresenta-se um roteiro com o desenvolvimento deste. Neste trabalho, o modelo CPM foi aplicado para avaliar analiticamente modelos de otimização aplicáveis para agregados, através da obtenção da densidade de empacotamento de uma mistura com as quatro classes de tamanho de grãos disponíveis para a areia normal do IPT. Logo, o número de classes (n) é igual a 4. Como dados de entrada para a aplicação do modelo, têm-se:

- O diâmetro de cada classe de tamanho de grãos, chamado de d_i ;
- O volume relativo de grãos presente em cada classe, chamado de y_i ;
- A densidade de empacotamento de cada classe, individualmente, chamada β_i .

Os diâmetros das quatro classes estudadas são os mesmos referentes a cada fração da areia normal do IPT. Para determinar os volumes relativos de cada classe, será utilizado como exemplo o caso da composição granulométrica obtida pela aplicação do modelo de Funk e Dinger (1980), tendo sido esta a que apresentou a maior densidade de empacotamento, dentre os modelos estudados. Por fim, as densidades de empacotamento de cada classe, individualmente, foram determinadas experimentalmente segundo a Equação (3) indicada no item 2.2.3, que tem como base as massas específica e unitária dos grãos. Dessa forma, os dados de entrada necessários à aplicação do modelo, relativos a cada uma das 4 classes estudadas, estão apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Dados de entrada para a aplicação do modelo CPM

Classe (n=4)	d_i (µm)	Volume de cada classe (%)	y_i	β_i
1	1200	35,26	$y_1 = 35,26/100 = 0,3526$	0,441
2	600	27,29	$y_2 = 27,29/100 = 0,2729$	0,430
3	300	21,11	$y_3 = 21,11/100 = 0,2111$	0,424
4	150	16,34	$y_4 = 16,34/100 = 0,1634$	0,420

O procedimento de cálculo consiste em uma sequência de passos, descritos à continuação, para a obtenção dos valores da densidade de empacotamento virtual e real.

1º Passo: Determinação dos efeitos de interação entre partículas

Os efeitos de interação entre partículas são calculados através dos coeficientes a_{ij} e b_{ij} correspondentes ao efeito de afastamento e efeito parede, respectivamente, conforme Equações (4) e (5) apresentadas no item 2.2.3. É importante ressaltar que é necessário calcular estes coeficientes para todas as possíveis combinações entre classes de grãos, o que resulta nas matrizes apresentadas nas Tabelas A.2 e A.3.

Tabela A.2 – Resultados do coeficiente a_{ij} , referente ao efeito de afastamento

a_{ij}		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	0,712	0,504	0,357
	2	Valor $\notin \mathbb{R}$	1,00	0,712	0,504
	3	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$	1,00	0,712
	4	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$	1,00

Tabela A.3 – Resultados do coeficiente b_{ij} , referente ao efeito parede

b_{ij}		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$
	2	0,646	1,00	Valor $\notin \mathbb{R}$	Valor $\notin \mathbb{R}$
	3	0,350	0,646	1,00	Valor $\notin \mathbb{R}$
	4	0,182	0,350	0,646	1,00

De forma mais detalhada, para o cálculo dos coeficientes a_{11} , a_{12} e a_{21} , por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (A.1) a (A.3), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela A.2.

$$a_{11} = \sqrt{1 - (1 - d_1/d_1)^{1,02}} = \sqrt{1 - (1 - 1200/1200)^{1,02}} = 1,00 \quad (\text{A.1})$$

$$a_{12} = \sqrt{1 - (1 - d_2/d_1)^{1,02}} = \sqrt{1 - (1 - 600/1200)^{1,02}} = 0,712 \quad (\text{A.2})$$

$$a_{21} = \sqrt{1 - (1 - d_1/d_2)^{1,02}} = \sqrt{1 - (1 - 1200/600)^{1,02}} = \notin \mathbb{R} \quad (\text{A.3})$$

Similarmente, para o cálculo dos coeficientes b_{11} , b_{12} e b_{21} , por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (A.4) a (A.6), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela A.3.

$$b_{11} = 1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_1}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{1200}{1200}\right)^{1,50} = 1,00 \quad (\text{A.4})$$

$$b_{12} = 1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{1200}{600}\right)^{1,50} = \notin \mathbb{R} \quad (\text{A.5})$$

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{600}{1200}\right)^{1,50} = 0,646 \quad (\text{A.6})$$

O cálculo dos coeficientes a_{ij} e b_{ij} , referentes ao efeito de afastamento e efeito parede, respectivamente, devem ser feitos para todas as possíveis combinações entre classes de grãos seguindo os mesmos princípios indicados nas Equações (A.1) a (A.6).

Através das Tabelas A.2 e A.3, pode-se observar que quando são combinadas classes cujos diâmetros dos grãos são iguais; ou seja, quando $d_i = d_j$, o resultados dos coeficientes é igual à unidade. Isso faz com que a diagonal principal de ambas as matrizes a_{ij} e b_{ij} corresponda a 1,00. Isso se justifica, pois grãos de mesmo tamanho não provocam efeito de afastamento ou efeito parede uns sobre os outros. Estes efeitos estão presentes apenas quando os diâmetros entre as classes de grãos são diferentes.

Os dados mostram, também, que o resultado encontrado para algumas combinações de classes não pertencem ao conjunto dos números reais (\mathbb{R}), o que impossibilita o prosseguimento do cálculo para as respectivas combinações. Para o coeficiente a_{ij} , isso ocorre quando o $d_i < d_j$, o que justifica-se, pois o efeito de afastamento é resultado da ação de partículas de menor tamanho sobre partículas de maior tamanho, como mostrado na Figura 4, item 2.2.3. Logo, sempre que $d_i < d_j$, não se verificará ocorrência de efeito de afastamento. Para o coeficiente b_{ij} observa-se o contrário e o fato verifica-se quando $d_i > d_j$. O efeito parede é o resultado da ação de partículas de maior tamanho sobre partículas de menor tamanho, logo, se $d_i > d_j$, não haverá efeito parede.

Finalmente, nota-se que os resultados apresentados nas diagonais secundárias das matrizes apresentadas nas Tabelas A.2 e A.3 são iguais. Isto ocorre sempre que a relação entre os diâmetros das classes estudadas for constante, o que facilita a conferência dos resultados encontrados em todas as células das matrizes. No presente estudo, a razão entre os diâmetros das classes é constante, igual a 2.

2º Passo: Determinação da densidade de empacotamento virtual

O segundo passo consiste em determinar a densidade de empacotamento virtual através da Equação (6) presente no item 2.2.3, considerando em cada etapa de cálculo uma classe de grãos como dominante (i). Dessa forma, foram desenvolvidas quatro equações, uma para cada classe dominante conforme indicado nas Equações (A.7) a (A.10).

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{\beta_1}{1 - \sum_{j=1}^{1-1=0} \left[1 - \beta_1 + b_{1j} \cdot \beta_1 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=1+1=2}^4 \left[1 - a_{1j} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_1}{1 - \left\{ \left[1 - a_{12} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2} \right] \cdot y_2 + \left[1 - a_{13} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_3} \right] \cdot y_3 + \left[1 - a_{14} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_4} \right] \cdot y_4 \right\}}\end{aligned}\quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned}\gamma_2 &= \frac{\beta_2}{1 - \sum_{j=1}^{2-1=1} \left[1 - \beta_2 + b_{2j} \cdot \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=2+1=3}^4 \left[1 - a_{2j} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_2}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_2 + b_{21} \cdot \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 - \left\{ \left[1 - a_{23} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_3} \right] \cdot y_3 + \left[1 - a_{24} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_4} \right] \cdot y_4 \right\} \right\}}\end{aligned}\quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned}\gamma_3 &= \frac{\beta_3}{1 - \sum_{j=1}^{3-1=2} \left[1 - \beta_3 + b_{3j} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=3+1=4}^4 \left[1 - a_{3j} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_3}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_3 + b_{31} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_3 + b_{32} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 - \left[1 - a_{34} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_4} \right] \cdot y_4 \right\}}\end{aligned}\quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned}\gamma_4 &= \frac{\beta_4}{1 - \sum_{j=1}^{4-1=3} \left[1 - \beta_4 + b_{4j} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=4+1=5}^4 \left[1 - a_{4j} \cdot \frac{\beta_4}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_4}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_4 + b_{41} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_4 + b_{42} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 + \left[1 - \beta_4 + b_{43} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3} \right) \right] \cdot y_3 \right\}}\end{aligned}\quad (\text{A.10})$$

Substituindo os valores correspondentes nas equações (A.7) a (A.10) tem-se, respectivamente, as equações (A.11) a (A.14), que apresentam os resultados de densidade de empacotamento virtual, considerando cada uma das classes como dominantes.

$$\gamma_1 = \frac{0,441}{1 - \left\{ \left[1 - 0,712 \cdot \frac{0,441}{0,436} \right] \cdot 0,2729 + \left[1 - 0,504 \cdot \frac{0,441}{0,424} \right] \cdot 0,2111 + \left[1 - 0,357 \cdot \frac{0,441}{0,420} \right] \cdot 0,1634 \right\}} = 0,610 \quad (\text{A.11})$$

$$\gamma_2 = \frac{0,431}{1 - \left\{ \left[1 - 0,431 + 0,646 \cdot 0,431 \left(1 - \frac{1}{0,441} \right) \right] \cdot 0,3526 - \left\{ \left[1 - 0,712 \cdot \frac{0,431}{0,424} \right] \cdot 0,2111 + \left[1 - 0,504 \cdot \frac{0,431}{0,420} \right] \cdot 0,1634 \right\} \right\}} = 0,548 \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma_3 = \frac{0,424}{1 - \left\{ \left[1 - 0,424 + 0,350 \cdot 0,424 \left(1 - \frac{1}{0,441} \right) \right] \cdot 0,3526 + \left[1 - 0,424 + 0,646 \cdot 0,424 \left(1 - \frac{1}{0,431} \right) \right] \cdot 0,2729 - \left[1 - 0,712 \cdot \frac{0,424}{0,420} \right] \cdot 0,1634 \right\}} = 0,559 \quad (\text{A.13})$$

$$\gamma_4 = \frac{0,420}{1 - \left\{ \left[1 - 0,42 + 0,182 \cdot 0,42 \left(1 - \frac{1}{0,441} \right) \right] \cdot 0,3526 + \left[1 - 0,42 + 0,350 \cdot 0,420 \left(1 - \frac{1}{0,431} \right) \right] \cdot 0,2729 + \left[1 - 0,42 + 0,646 \cdot 0,42 \left(1 - \frac{1}{0,424} \right) \right] \cdot 0,2111 \right\}} = 0,618 \quad (\text{A.14})$$

Com base nos resultados desenvolvidos tem-se a densidade de empacotamento virtual do conjunto, a qual corresponde ao menor valor encontrado, como segue Equação (A.15)

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma_i) \quad 1 \leq i \leq 4 = 0,548 \quad (\text{A.15})$$

Observa-se que a densidade de empacotamento virtual do conjunto granular foi obtida ao considerar a classe 2, de tamanho 0,6 mm, como dominante ($\gamma_2 = 0,565$). Ou seja, ao admitir que a concentração de grãos dessa classe é suficiente para garantir a integridade granular da mistura.

3º Passo: Determinação da densidade de empacotamento real

A última etapa de cálculo consiste em determinar a densidade de empacotamento real (Φ), a qual considera a aplicação de uma energia de compactação (K) relacionada ao processo experimental utilizado na determinação dos valores de β_i . Nesse caso adotou-se um valor de $K = 4,5$, pois este corresponde ao processo de aplicação de compactação por apiloamento.

Assim, a densidade de empacotamento real do conjunto pode ser determinada indiretamente segundo Equação (8), indicada no item 2.2.3. Ao desenvolver a referida equação e substituir as incógnitas pelos valores obtêm-se as Equações (A.16) e (A.17).

$$K = \sum_{i=1}^4 \frac{y_i/\beta_i}{1/\phi - 1/\gamma_i} = \frac{y_1/\beta_1}{1/\phi - 1/\gamma_1} + \frac{y_2/\beta_2}{1/\phi - 1/\gamma_2} + \frac{y_3/\beta_3}{1/\phi - 1/\gamma_3} + \frac{y_4/\beta_4}{1/\phi - 1/\gamma_4} \quad (\text{A.16})$$

$$4,5 = \frac{0,3526/0,441}{1/\phi - 1/0,610} + \frac{0,2729/0,430}{1/\phi - 1/0,548} + \frac{0,2111/0,424}{1/\phi - 1/0,559} + \frac{0,1634/0,420}{1/\phi - 1/0,618} \quad (\text{A.17})$$

A Equação (A.17) ao ser resolvida manualmente resulta em uma equação do 4º grau, por apresentar 4 termos referentes às 4 classes de grãos do presente estudo. Dessa forma, sua resolução foi facilitada pela utilização do *software* matemático *Maple* o qual gera o resultado das quatro raízes da equação. A densidade de empacotamento real (Φ) corresponde a raiz $\in \mathbb{R}$ de menor valor, nesse caso equivalente a **0,444**.

APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CIPM

A fim de propor uma melhor compreensão do procedimento de cálculo referente ao modelo CIPM, de Fennis (2011), apresenta-se um roteiro com o desenvolvimento deste. Neste trabalho, o modelo CIPM foi aplicado para avaliar analiticamente as proporções de agregados e finos e para dosagem do concreto ecológico. Como exemplo será demonstrado o procedimento de cálculo da densidade de empacotamento real da mistura 4, apresentada previamente na Tabela 20 (do item 4.3), e que representa a composição, com agregados otimizados, que resultou na maior densidade de empacotamento. Os materiais que compõem a mistura são brita 1, brita 0, areia e cimento, considerando cada um como uma classe. Logo, o número de classes (n) é igual a 4. Como dados de entrada para a aplicação do modelo, têm-se:

- O diâmetro de cada classe de tamanho de grãos, chamado de d_i ;
- O volume relativo de grãos presente em cada classe, chamado de y_i ;
- A densidade de empacotamento de cada classe, individualmente, chamada β_i .

Os diâmetros das quatro classes estudadas são resultantes de ensaio experimental de caracterização dos materiais. O volume relativo do cimento foi o mesmo obtido pelo traço de referência. O volume relativo dos agregados foi a proporção que apresentou máxima densidade de empacotamento teórica pelo modelo CIPM (28% brita 1, 42% brita 0 e 30% areia). Por fim, as densidades de empacotamento de cada classe, individualmente, foram determinadas experimentalmente segundo a Equação (3) indicada no item 2.2.3 para os agregados, que tem como base as massas específica e unitária dos grãos. Para o cimento a densidade de empacotamento foi obtida através do método de Wong e Kwan (2008) discutido na seção 2.2.5. Dessa forma, os dados de entrada necessários à aplicação do modelo, relativos a cada uma das 4 classes estudadas, estão apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Dados de entrada para a aplicação do modelo CIPM

Classe ($n = 4$)	Material	d_i (μm)	Volume de cada classe (%)	y_i	β_i
1	Brita 1	19000	$0,28 \cdot (100 - 16,30) = 23,44$	$y_I = 23,44/100 = 0,2344$	0,570
2	Brita 0	4800	$0,42 \cdot (100 - 16,30) = 35,15$	$y_I = 35,15/100 = 0,3515$	0,612
3	Areia	600	$0,30 \cdot (100 - 16,30) = 25,11$	$y_I = 25,11/100 = 0,2511$	0,658
4	Cimento	15,86	16,30	$y_I = 16,30/100 = 0,1630$	0,641

O procedimento de cálculo consiste em uma sequência de passos, descritos à continuação, para a obtenção dos valores da densidade de empacotamento virtual e real.

1º Passo: Determinação dos efeitos de interação entre partículas

Os efeitos de interação entre partículas são calculados através dos coeficientes $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$ correspondentes ao efeito de afastamento e efeito parede, respectivamente, conforme Equações (10) e (11) apresentadas na seção 0. É importante ressaltar que é necessário calcular estes coeficientes para todas as possíveis combinações entre as classes.

Primeiramente é feito o cálculo da função para o máximo alcance dos efeitos de afastamento e parede, o que resulta nas matrizes apresentadas nas Tabelas B.2 e B.3.

Tabela B.2 – Resultados da função para o máximo alcance do efeito de afastamento

$w_{0,a}$		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	1,00	1,00	1,50
	2	1,00	1,00	1,00	1,50
	3	1,00	1,00	1,00	1,50
	4	1,00	1,00	1,00	1,50

Tabela B.3 – Resultados da função para o máximo alcance do efeito parede

$w_{0,b}$		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	1,00	1,00	1,00	1,00
	4	0,20	0,20	0,20	0,20

De forma mais detalhada, para o cálculo da função de máximo efeito de afastamento para a primeira linha da matriz, por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (B.1) a (B.4), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela B.2.

$$w_{0,a}(j = 1) = \begin{cases} d_1 < 25\mu m = 19000 < 25 \text{ (falso)} \\ d_1 \geq 25\mu m = 19000 \geq 25 \text{ (verdadeiro)} \end{cases} \therefore w_{0,a} = w_a = 1,00 \quad (\text{B.1})$$

$$w_{0,a}(j = 2) = \begin{cases} d_2 < 25\mu m = 4800 < 25 \text{ (F)} \\ d_2 \geq 25\mu m = 4800 \geq 25 \text{ (V)} \end{cases} \therefore w_{0,a} = w_a = 1,00 \quad (\text{B.2})$$

$$w_{0,a}(j = 3) = \begin{cases} d_3 < 25\mu m = 600 < 25 \text{ (F)} \\ d_3 \geq 25\mu m = 600 \geq 25 \text{ (V)} \end{cases} \therefore w_{0,a} = w_a = 1,00 \quad (\text{B.3})$$

$$w_{0,a}(j = 4) = \begin{cases} d_4 < 25\mu m = 15,86 < 25 \text{ (V)} \\ d_4 \geq 25\mu m = 15,86 \geq 25 \text{ (F)} \end{cases} \therefore w_{0,a} = w_a \cdot C_a = 1,0 \cdot 1,5 = 1,50 \quad (\text{B.4})$$

Similarmente, para o cálculo da função de máximo efeito parede para a primeira coluna da matriz, por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (B.5) a (B.8), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela B.3.

$$w_{0,b}(i = 1) = \begin{cases} d_1 < 25\mu m = 19000 < 25 (F) \\ d_1 \geq 25\mu m = 19000 \geq 25 (V) \end{cases} \therefore w_{0,b} = w_b = 1,00 \quad (B.5)$$

$$w_{0,b}(i = 2) = \begin{cases} d_2 < 25\mu m = 4800 < 25 (F) \\ d_2 \geq 25\mu m = 4800 \geq 25 (V) \end{cases} \therefore w_{0,b} = w_b = 1,00 \quad (B.6)$$

$$w_{0,b}(i = 3) = \begin{cases} d_3 < 25\mu m = 600 < 25 (F) \\ d_3 \geq 25\mu m = 600 \geq 25 (V) \end{cases} \therefore w_{0,b} = w_b = 1,00 \quad (B.7)$$

$$w_{0,b}(i = 4) = \begin{cases} d_4 < 25\mu m = 15,86 < 25 (V) \\ d_4 \geq 25\mu m = 15,86 \geq 25 (F) \end{cases} \therefore w_{0,b} = w_b \cdot C_b = 1,0 \cdot 0,2 = 0,20 \quad (B.8)$$

Observa-se que ao considerar a classe de cimento como dominante ($i=4$) a função de máximo efeito de afastamento ($w_{0,a}$) é maior, pois nesse caso as partículas de cimento tendem a se aglomerar devido ao tamanho que possuem. Isso acaba provocando a diminuição do efeito parede.

Para facilitar o cálculo dos coeficientes $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$ sugere-se elaborar matrizes com os cálculos dos logaritmos da relação entre os diâmetros, conforme apresentado nas Tabelas B.4 e B.5.

Tabela B.4 – Resultados do logaritmo entre os diâmetros, referente ao efeito de afastamento

$\log\left(\frac{d_i}{d_j}\right)$		j			
		1	2	3	4
i	1	0,00	0,598	1,501	3,078
	2	-0,598	0,00	0,903	2,481
	3	-1,501	-0,903	0,00	1,578
	4	-3,078	-2,481	-1,578	0,00

Tabela B.5 – Resultados do logaritmo entre os diâmetros, referente ao efeito parede

$\log\left(\frac{d_j}{d_i}\right)$		j			
		1	2	3	4
i	1	0,00	-0,598	-1,501	-3,078
	2	0,598	0,00	-0,903	-2,481
	3	1,501	0,903	0,00	-1,578
	4	3,078	2,481	1,578	0,00

Em seguida, é feito o cálculo dos coeficientes, $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$ cujos resultados seguem nas Tabelas B.6 e B.7.

Tabela B.6 – Resultados do logaritmo entre os diâmetros, referente ao efeito de afastamento

$a_{ij,c}$		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	0,402	0,00	0,00
	2	-	1,00	0,097	0,00
	3	-	-	1,00	0,00
	4	-	-	-	1,00

Tabela B.7 – Resultados do logaritmo entre os diâmetros, referente ao efeito parede

$b_{ij,c}$		j			
		1	2	3	4
i	1	1,00	-	-	-
	2	0,402	1,00	-	-
	3	0,00	0,097	1,00	-
	4	0,00	0,00	0,00	1,00

De forma mais detalhada, para o cálculo dos coeficientes $a_{11,c}$, $a_{12,c}$ e $a_{13,c}$, por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (B.9) a (B.11), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela B.6.

$$a_{11,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_1}{d_1}\right) < w_{0,a} = 0,0 < 1,0 \text{ (V)} \\ \log\left(\frac{d_1}{d_1}\right) \geq w_{0,a} = 0,0 \geq 1,0 \text{ (F)} \end{cases} \therefore a_{11,c} = 1 - \frac{\log\left(\frac{d_1}{d_1}\right)}{w_{0,a}} = 1 - \frac{0,0}{1,0} = 1,0 \quad (\text{B.9})$$

$$a_{12,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_1}{d_2}\right) < w_{0,a} = 0,598 < 1,0 \text{ (V)} \\ \log\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \geq w_{0,a} = 0,598 \geq 1,0 \text{ (F)} \end{cases} \therefore a_{12,c} = 1 - \frac{\log\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{w_{0,a}} = 1 - \frac{0,598}{1,0} = 0,402 \quad (\text{B.10})$$

$$a_{13,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_1}{d_3}\right) < w_{0,a} = 1,501 < 1,0 \text{ (F)} \\ \log\left(\frac{d_1}{d_3}\right) \geq w_{0,a} = 1,501 \geq 1,0 \text{ (V)} \end{cases} \therefore a_{13,c} = 0,00 \quad (\text{B.11})$$

Do mesmo modo, para o cálculo dos coeficientes $b_{11,c}$, $b_{12,c}$ e $b_{13,c}$, por exemplo, têm-se os resultados apresentados nas Equações (B.12) a (B.14), os quais estão de acordo com os apresentados na Tabela B.7.

$$b_{11,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_1}{d_1}\right) < w_{0,b} = 0,0 < 1,0 \text{ (V)} \\ \log\left(\frac{d_1}{d_1}\right) \geq w_{0,b} = 0,0 \geq 1,0 \text{ (F)} \end{cases} \therefore b_{11,c} = 1 - \frac{\log\left(\frac{d_1}{d_1}\right)}{w_{0,b}} = 1 - \frac{0,0}{1,0} = 1,0 \quad (\text{B.12})$$

$$b_{12,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right) < w_{0,b} = 0,598 < 1,0 \text{ (V)} \\ \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \geq w_{0,b} = 0,598 \geq 1,0 \text{ (F)} \end{cases} \therefore b_{12,c} = 1 - \frac{\log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{w_{0,a}} = 1 - \frac{0,598}{1,0} = 0,402 \quad (\text{B.13})$$

$$b_{13,c} = \begin{cases} \log\left(\frac{d_3}{d_1}\right) < w_{0,b} = 1,501 < 1,0 \text{ (F)} \\ \log\left(\frac{d_3}{d_1}\right) \geq w_{0,b} = 1,501 \geq 1,0 \text{ (V)} \end{cases} \therefore b_{13,c} = 0,00 \quad (\text{B.14})$$

O cálculo dos coeficientes $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$, referentes ao efeito de afastamento e efeito parede, respectivamente, devem ser feitos para todas as possíveis combinações entre classes de grãos.

Os dados das Tabelas B.4 e B.5 mostram que o resultado encontrado para algumas combinações de classes são negativos, o que impossibilita o prosseguimento do cálculo para as respectivas combinações, uma vez que não são aceitos efeitos de interação negativos. Para o coeficiente $a_{ij,c}$, isso ocorre quando o $d_i < d_j$, o que justifica-se, pois o efeito de afastamento é resultado da ação de partículas de menor tamanho sobre partículas de maior tamanho, como mostrado na Figura 4 no item 2.2.3. Logo, sempre que $d_i < d_j$, não se verificará ocorrência de efeito de afastamento. Para o coeficiente $b_{ij,c}$ observa-se o contrário e o fato verifica-se quando $d_i > d_j$. O efeito parede é o resultado da ação de partículas de maior tamanho sobre partículas de menor tamanho, logo, se $d_i > d_j$, não haverá efeito parede.

Através das Tabelas B.6 e B.7, pode-se observar, também, que quando são combinadas classes cujos diâmetros dos grãos são iguais; ou seja, quando $d_i = d_j$, o resultados dos coeficientes é igual à unidade. Isso faz com que a diagonal principal de ambas as matrizes $a_{ij,c}$ e $b_{ij,c}$ corresponda a 1,00. Isso se justifica, pois grãos de mesmo tamanho não provocam efeito de afastamento ou efeito parede uns sobre os outros. Estes efeitos estão presentes apenas quando os diâmetros entre as classes de grãos são diferentes.

2° Passo: Determinação da densidade de empacotamento virtual

O segundo passo consiste em determinar a densidade de empacotamento virtual através da Equação (9) do item 2.2.4, considerando em cada etapa de cálculo uma classe de grãos como dominante (i). Dessa forma, foram desenvolvidas quatro equações, uma para cada classe dominante conforme indicado nas Equações (B.15) a (B.18).

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \sum_{j=1}^{1-1=0} \left[1 - \beta_1 + b_{1j,c} \cdot \beta_1 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot \gamma_j - \sum_{j=1+1=2}^4 \left[1 - a_{1j,c} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_j} \right] \cdot \gamma_j} \quad (\text{B.15})$$

$$= \frac{\beta_1}{1 - \left\{ \left[1 - a_{12,c} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2} \right] \cdot \gamma_2 + \left[1 - a_{13,c} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_3} \right] \cdot \gamma_3 + \left[1 - a_{14,c} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_4} \right] \cdot \gamma_4 \right\}}$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \frac{\beta_2}{1 - \sum_{j=1}^{2-1=1} \left[1 - \beta_2 + b_{2j,c} \cdot \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=2+1=3}^4 \left[1 - a_{2j,c} \frac{\beta_2}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_2}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21,c} \cdot \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 - \left\{ \left[1 - a_{23,c} \frac{\beta_2}{\beta_3} \right] \cdot y_3 + \left[1 - a_{24,c} \frac{\beta_2}{\beta_4} \right] \cdot y_4 \right\}} \end{aligned} \quad (B.16)$$

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= \frac{\beta_3}{1 - \sum_{j=1}^{3-1=2} \left[1 - \beta_3 + b_{3j,c} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=3+1=4}^4 \left[1 - a_{3j,c} \frac{\beta_3}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_3}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_3 + b_{31,c} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_3 + b_{32,c} \cdot \beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 \right\} - \left[1 - a_{34,c} \frac{\beta_3}{\beta_4} \right] \cdot y_4} \end{aligned} \quad (B.17)$$

$$\begin{aligned} \gamma_4 &= \frac{\beta_4}{1 - \sum_{j=1}^{4-1=3} \left[1 - \beta_4 + b_{4j,c} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=4+1=5}^4 \left[1 - a_{4j,c} \frac{\beta_4}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \\ &= \frac{\beta_4}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_4 + b_{41,c} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_4 + b_{42,c} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 + \left[1 - \beta_4 + b_{43,c} \cdot \beta_4 \left(1 - \frac{1}{\beta_3} \right) \right] \cdot y_3 \right\}} \end{aligned} \quad (B.18)$$

Substituindo os valores correspondentes nas equações (B.15) a (B.18) tem-se, respectivamente, as equações (B.19) a (B.22), que apresentam os resultados de densidade de empacotamento virtual, considerando cada uma das classes como dominantes.

$$\gamma_1 = \frac{0,570}{1 - \left\{ \left[1 - 0,402 \frac{0,570}{0,612} \right] \cdot 0,3515 + \left[1 - 0,0 \frac{0,570}{0,658} \right] \cdot 0,2511 + \left[1 - 0,0 \frac{0,570}{0,641} \right] \cdot 0,163 \right\}} = 1,557 \quad (B.19)$$

$$\gamma_2 = \frac{0,612}{1 - \left[1 - 0,612 + 0,402 \cdot 0,612 \left(1 - \frac{1}{0,570} \right) \right] \cdot 0,2344 - \left\{ \left[1 - 0,097 \frac{0,612}{0,658} \right] \cdot 0,2511 + \left[1 - 0,0 \frac{0,612}{0,641} \right] \cdot 0,163 \right\}} = 1,091 \quad (B.20)$$

$$\gamma_3 = \frac{0,658}{1 - \left\{ \left[1 - 0,658 + 0,0 \cdot 0,658 \left(1 - \frac{1}{0,570} \right) \right] \cdot 0,2344 + \left[1 - 0,658 + 0,097 \cdot 0,658 \left(1 - \frac{1}{0,612} \right) \right] \cdot 0,3515 \right\} - \left[1 - 0,0 \frac{0,658}{0,641} \right] \cdot 0,163} = 1,011 \quad (B.21)$$

$$\gamma_4 = \frac{0,641}{1 - \left\{ \left[1 - 0,641 + 0,0 \cdot 0,641 \left(1 - \frac{1}{0,57} \right) \right] \cdot 0,2344 + \left[1 - 0,641 + 0,0 \cdot 0,641 \left(1 - \frac{1}{0,612} \right) \right] \cdot 0,3515 + \left[1 - 0,641 + 0,0 \cdot 0,641 \left(1 - \frac{1}{0,658} \right) \right] \cdot 0,2511 \right\}} = 0,916 \quad (B.22)$$

Com base nos resultados desenvolvidos tem-se a densidade de empacotamento virtual do conjunto, a qual corresponde ao menor valor encontrado, como segue Equação (B.23)

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma_i) \quad 1 \leq i \leq 4 = 0,916 \quad (B.23)$$

Observa-se que a densidade de empacotamento virtual do conjunto granular foi obtida ao considerar a classe 4 correspondente ao cimento como dominante ($\gamma_4 = 0,916$). Ou seja, ao

admitir que a concentração de partículas dessa classe é suficiente para garantir a integridade granular da mistura.

3º Passo: *Determinação da densidade de empacotamento real*

A última etapa de cálculo consiste em determinar a densidade de empacotamento real (Φ), a qual considera a aplicação de uma energia de compactação (K) relacionada ao processo experimental utilizado na determinação dos valores de β_i . Nesse caso adotou-se um valor de $K = 12$, pois este corresponde ao processo de aplicação de compactação relacionada ao Proctor Teste que corresponde ao método de Wonk e Kwan (2008) de densidade de empacotamento de materiais finos, nesse caso o cimento foi caracterizado quando a este método.

Assim, a densidade de empacotamento real do conjunto pode ser determinada indiretamente segundo Equação (8), indicada no item 2.2.3. Ao desenvolver a referida equação e substituir as incógnitas pelos valores obtêm-se as Equações (B.24) e (B.25).

$$K = \sum_{i=1}^4 \frac{y_i/\beta_i}{1/\phi - 1/\gamma_i} = \frac{y_1/\beta_1}{1/\phi - 1/\gamma_1} + \frac{y_2/\beta_2}{1/\phi - 1/\gamma_2} + \frac{y_3/\beta_3}{1/\phi - 1/\gamma_3} + \frac{y_4/\beta_4}{1/\phi - 1/\gamma_4} \quad (\text{B.24})$$

$$12 = \frac{0,2344/0,570}{1/\phi - 1/1,557} + \frac{0,3515/0,612}{1/\phi - 1/1,091} + \frac{0,2511/0,658}{1/\phi - 1/1,011} + \frac{0,1630/0,641}{1/\phi - 1/0,916} \quad (\text{B.25})$$

A Equação (B.25) ao ser resolvida manualmente resulta em uma equação do 4º grau, por apresentar 4 termos referentes às 4 classes do presente estudo. Dessa forma, sua resolução foi facilitada pela utilização do *software* matemático *Maple* o qual gera o resultado das quatro raízes da equação. A densidade de empacotamento real (Φ) corresponde a raiz $\ni \mathbb{R}$ de menor valor, nesse caso equivalente a **0,881**.

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

As propriedades e resultados dos ensaios de caracterização realizados para a areia, apresentada no item 3.1.2, seguem descritos nas Tabelas C.1 a C.5.

Tabela C.1 – Ensaio de granulometria da areia

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Média (g)	% retida média	% acumulada	% passante
4,8	0,00	0,24	0,12	0,04	0,04	99,96
2,4	22,58	22,38	22,48	7,49	7,53	92,47
1,2	55,25	54,60	54,93	18,31	25,84	74,16
0,6	62,42	65,21	63,82	21,27	47,11	52,89
0,3	37,00	38,30	37,65	12,55	59,66	40,34
0,15	68,48	61,72	65,10	21,70	81,36	18,64
Fundo	54,47	57,35	55,91	18,64	100,00	0,00
Total	300,2	299,8	300,00	100	-	-

Tabela C.2 – Ensaio de massa unitária no estado compactado da areia e suas frações

Fração (mm)	Massa (g)			Massa unitária (g/cm³)			Desvio padrão	Média (g/cm³)	Vazios	Dens. Emp
Mistura completa	17.610	17.500	17.550	1,728	1,717	1,722	0,0054	1,723	0,343	0,657
2,4	552,80	552,40	553,80	1,383	1,382	1,386	0,0018	1,384	0,472	0,528
1,2	560,30	561,00	558,70	1,402	1,404	1,398	0,0029	1,401	0,465	0,535
0,6	562,60	561,60	561,20	1,408	1,405	1,404	0,0018	1,406	0,463	0,537
0,3	550,90	553,30	550,30	1,378	1,384	1,377	0,0040	1,380	0,473	0,527
0,15	573,80	574,10	572,50	1,436	1,436	1,432	0,0021	1,435	0,452	0,548

Tabela C.3 – Ensaio de massa específica da areia

Massa			Média (g)	Massa específica seca (g/cm³)	Massa esp. sup. saturada seca (g/cm³)
M ₁	855,8	872,4	864,10	2,62	2,63
M ₂	1165,1	1183,4	1174,25		
M _{seca}	497,75	496,42	497,09		

Tabela C.4 – Ensaio de absorção de água da areia

Massa			Média (g)	Absorção (%)
M _{inicial}	1000,00	1000,00	1000,00	0,40
M _{final}	1003,19	1004,83	1004,01	

Tabela C.5 – Ensaio de material pulverulento da areia

Massa			Média (g)	Material pulverulento (%)
M _{inicial}	500,00	500,00	500,00	8,17
M _{final}	451,5	466,8	459,15	

As propriedades e resultados dos ensaios de caracterização realizados para a brita 0, apresentada no item 3.1.2, seguem descritos nas Tabelas C.6 a C.9.

Tabela C.6 – Ensaio de granulometria da brita 0

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Média (g)	% retida média	% acumulada	% passante
9,5	2,00	0,00	1,00	0,10	0,10	99,90
6,3	213,06	195,86	204,46	20,45	20,55	79,45
4,8	273,40	242,14	257,77	25,78	46,32	53,68
2,4	439,97	458,55	449,26	44,93	91,25	8,75
1,2	31,29	45,58	38,44	3,84	95,09	4,91
0,6	5,30	12,39	8,85	0,88	95,98	4,02
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	95,98	4,02
0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	95,98	4,02
Fundo	34,98	45,48	40,23	4,02	100,00	0,00
Total	1000,0	1000,0	1000,0	100,00	-	-

Tabela C.7 – Ensaio de massa unitária no estado compactado da brita 0 e suas frações

Fração (mm)	Massa (g)			Massa unitária (g/cm³)			Desvio padrão	Média (g/cm³)	Vazios	Dens. Emp.
Mistura completa	17.460	17.420	17.440	1,713	1,710	1,711	0,0020	1,711	0,388	0,612
6,3	667,78	666,89	671,11	1,671	1,669	1,679	0,0056	1,673	0,371	0,629
4,8	670,04	667,30	671,20	1,676	1,670	1,679	0,0050	1,675	0,370	0,630
2,4	658,31	663,77	664,98	1,647	1,661	1,664	0,0089	1,657	0,377	0,623

Tabela C.8 – Ensaio de massa específica da brita 0

Massa		Média (g)	Massa esp. seca (g/cm³)	Massa esp. sup. sat. seca (g/cm³)	Massa esp. aparente (g/cm³)	Absorção (%)
M _{seca}	1939,60	1939,60	2,80	2,77	2,75	0,570
M _{água}	1245,68	1245,68				
M _{sss}	1950,66	1950,66				

Tabela C.9 – Ensaio de material pulverulento da brita 0

Massa		Média (g)	Material pulverulento (%)
M _{inicial}	1000,00	1000,00	8,17
M _{final}	986,30	986,30	

As propriedades e resultados dos ensaios de caracterização realizados para a brita 1, apresentada no item 3.1.2, seguem descritos nas Tabelas C.10 a C.13.

Tabela C.10 – Ensaio de granulometria da brita 1

Peneira (mm)	Massa retida (g)		Média (g)	% retida média	% acumulada	% passante
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
19	121,33	128,15	124,74	2,49	2,49	97,51
12,5	3475,41	3380,98	3428,20	68,56	71,06	28,94
9,5	1092,11	1156,10	1124,11	22,48	93,54	6,46
6,3	305,79	330,53	318,16	6,36	99,90	0,10
4,8	0,22	0,18	0,20	0,00	99,91	0,09
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	99,91	0,00
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	99,91	0,00
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	99,91	0,00
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	99,91	0,00
0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	99,91	0,00
Fundo	5,14	4,06	4,60	0,09	100,00	0,00
Total	5000,0	5000,0	5000,0	100,00	-	-

Tabela C.11 – Ensaio de granulometria da brita 1

Fração (mm)	Massa (g)			Massa unitária (g/cm³)			Desvio padrão	Média (g/cm³)	Vazios	Dens. Emp.
Mistura completa	15.350	15.510	15.500	1,506	1,522	1,521	0,0088	1,517	0,430	0,570
19	609,27	600,57	600,60	1,524	1,503	1,503	0,0125	1,510	0,432	0,568
12,5	600,60	597,70	611,60	1,503	1,495	1,530	0,0183	1,509	0,433	0,567
9,5	612,50	601,20	609,30	1,533	1,504	1,525	0,0146	1,520	0,428	0,572
6,3	598,00	584,56	597,30	1,496	1,463	1,494	0,0189	1,484	0,442	0,558

Tabela C.12 – Ensaio de massa específica da brita 1

Massa		Média (g)	Massa esp. seca (g/cm³)	Massa esp. sup. sat. seca (g/cm³)	Massa esp. aparente (g/cm³)	Absorção (%)
M _{seca}	3000,00	3000,00	2,67	2,65	2,65	0,28
M _{água}	1874,49	1875,34				
M _{sss}	3009,80	3007,00				

Tabela C.13 – Ensaio de material pulverulento da brita 1

Massa			Média (g)	Material pulverulento (%)
M _{inicial}	2500,00	2500,00	2500,00	0,64
M _{final}	2487,5	2480,7	2484,10	

Tabela C.14 – Ensaio índice de forma da brita 1 considerando a fração de 9,5 mm

Grão	Dimensões (2 leituras)				Média		
	c (mm)	e (mm)	c (mm)	e (mm)	c (mm)	e (mm)	c/e
1	19,80	5,72	19,98	5,74	19,89	5,73	3,47
2	27,49	11,42	27,09	9,63	27,29	10,53	2,59
3	22,96	9,50	23,02	9,19	22,99	9,35	2,46
4	16,01	8,01	13,35	7,82	14,68	7,92	1,85
5	21,73	7,02	21,71	6,98	21,72	7,00	3,10
6	20,25	7,89	20,10	7,93	20,18	7,91	2,55
7	28,25	10,11	28,40	9,56	28,33	9,84	2,88
8	23,17	7,70	24,05	7,79	23,61	7,75	3,05
9	21,23	7,36	21,01	7,14	21,12	7,25	2,91
10	18,12	7,61	18,95	7,66	18,54	7,64	2,43
11	18,50	8,85	18,93	8,12	18,72	8,49	2,21
12	23,78	6,00	23,98	5,88	23,88	5,94	4,02
13	24,09	9,64	24,08	9,90	24,09	9,77	2,47
14	19,09	9,48	19,22	9,56	19,16	9,52	2,01
15	17,74	4,97	17,76	4,80	17,75	4,89	3,63
16	21,50	10,58	21,35	9,37	21,43	9,98	2,15
17	20,08	8,75	19,50	8,65	19,79	8,70	2,27
18	20,81	8,85	20,83	8,92	20,82	8,89	2,34
19	19,34	7,78	19,37	7,69	19,36	7,74	2,50
20	31,77	8,54	32,47	8,24	32,12	8,39	3,83
21	23,32	6,50	23,06	6,37	23,19	6,44	3,60
22	18,60	10,57	18,40	10,61	18,50	10,59	1,75
23	13,95	8,06	13,82	7,79	13,89	7,93	1,75
24	17,97	10,61	18,09	9,31	18,03	9,96	1,81
25	15,79	8,05	15,99	8,01	15,89	8,03	1,98
26	21,04	5,58	20,16	5,49	20,60	5,54	3,72
27	20,17	7,78	20,73	7,87	20,45	7,83	2,61
28	17,39	9,74	17,29	10,96	17,34	10,35	1,68

APÊNCIDE D – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO TRAÇO ECOLÓGICO

A fim de propor uma melhor compreensão do procedimento de cálculo referente à previsão da resistência de dosagem do concreto ecológico pelo modelo de Fennis (2011) e Fennis *et al.* (2013b), apresenta-se um roteiro com o desenvolvimento deste. Neste trabalho, o método de dosagem foi aplicado para dosar analiticamente traços de concreto com redução da quantidade de cimento. O presente roteiro de cálculo trata-se do processo analítico para se obter a previsão da resistência do Traço Ecológico A, apresentado na **Erro! Fonte de eferência não encontrada.** no Capítulo 3.

O traço é composto por 6 materiais, logo o número de classes (n) é 6. O diâmetro de cada classe foi obtido através de ensaios de granulometria a laser, para os finos, e composição granulométrica para os agregados. O volume de cada classe (y) foi determinado através dos ajustes que foram sendo realizados, como descrito na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** do item 4.3. Por fim, as densidades de empacotamento de cada classe, individualmente, foram determinadas experimentalmente segundo a Equação (3) indicada no item 2.2.3 para os agregados, que tem como base as massas específica e unitária dos grãos. Para os finos a densidade de empacotamento foi obtida através do método de Wong e Kwan (2008) discutido na seção 2.2.5.

1º Passo: *Determinação da densidade de empacotamento do conjunto*

A densidade de empacotamento da mistura foi calculada pelo modelo CIPM, conforme demonstrado no Apêndice B. Os dados de entrada necessários ao cálculo da densidade de empacotamento, relativos a cada uma das 6 classes de materiais, bem como os resultados de densidade de empacotamento virtuais de cada classe estão apresentados na Tabela D.1.

Tabela D.1 – Dados de entrada para a aplicação do modelo CIPM e resultados de densidade de empacotamento virtual

Classe ($n = 6$)	Material	d_i (µm)	y_i	β_i	γ_i
1	Brita 1	19000	$y_1 = 24,25/100 = 0,2425$	0,570	1,505
2	Brita 0	4800	$y_2 = 36,37/100 = 0,3637$	0,612	1,054
3	Areia	600	$y_3 = 25,98/100 = 0,2598$	0,658	0,977
4	Cimento	15,86	$y_4 = 9,38/100 = 0,0938$	0,641	0,928
5	PQ	10,34	$y_5 = 2,68/100 = 0,0268$	0,561	0,963
6	SCA	7,86	$y_6 = 1,34/100 = 0,0134$	0,461	0,976

A densidade de empacotamento virtual da mistura obtida com a aplicação do CIPM foi de 0,928, e a densidade de empacotamento real (ϕ), para um valor de compactação (K) de 12, foi equivalente a 0,888.

2° Passo: Determinação da demanda de água

A partir disso verifica-se a demanda de água da mistura calculando, inicialmente, o volume relativo de sólidos (ϕ_{mix}) em função da consistência desejada e da densidade de empacotamento real obtida. Neste caso optou-se por adotar uma consistência plástica que corresponde a um intervalo de *slump test* de 10 a 15 cm e $\phi_{mix}/\phi = 0,95$. Multiplicando a densidade de empacotamento real 0,881, pela relação ϕ_{mix}/ϕ , tem-se um volume relativo de sólidos de 0,844. Isso representa que 84,4% da mistura são materiais sólidos, e o restante é a água necessária para preencher os vazios entre as partículas e para proporcionar a fluidez desejada. Dessa forma, o volume de água (V_w) pode ser calculado conforme Equação (D.1).

$$V_w = 1 - \phi_{mix} = 1 - 0,844 = 0,156 \quad (D.1)$$

Sendo assim, o concreto produzido a partir dessa combinação de materiais sólidos irá necessitar de 156 l/m³ de água.

3° Passo: Determinação da resistência de dosagem

Para determinar a resistência à compressão de dosagem prevista aos 28 dias é necessário inicialmente calcular a contribuição do cimento para o empacotamento da mistura. O volume parcial que as partículas do cimento estão ocupando é obtido conforme Equação (D.2).

$$\phi_{cem} = y_{cem} \cdot \phi = 0,0938 \cdot 0,888 = 0,083 \quad (D.2)$$

Em seguida determina-se o valor teórico correspondente ao volume máximo que o cimento pode ocupar devido à presença de outras partículas (ϕ^*_{cem}), sendo necessário estabelecer também a parcela de contribuição do cimento para o valor total do índice de compactação (K), como segue Equação (D.3).

$$K_{cem} = \sum_{i=1}^n \frac{y_c/\beta_c}{1/\phi - 1/\gamma_c} = \frac{0,0938/0,641}{1/0,888 - 1/0,928} = 3,00 \quad (D.3)$$

Similarmente, são feitos os cálculos para a adição mineral pozolânica, a sílica de casca de arroz, utilizada como aglomerante em substituição parcial do cimento. O desenvolvimento dos cálculos segue conforme Equações (D.4) e (D.5).

$$\varphi_{sca} = y_{sca} \cdot \phi = 0,0134 \cdot 0,888 = 0,012 \quad (D.4)$$

$$K_{sca} = \sum_{i=1}^n \frac{y_{sca}/\beta_{sca}}{1/\phi - 1/\gamma_{sca}} = \frac{0,012/0,461}{1/0,888 - 1/0,976} = 0,285 \quad (D.5)$$

Finalmente, calcula-se a contribuição total do cimento e da sílica de casca de arroz para o empacotamento do concreto, através das Equações (D.6) a (D.8)

$$\varphi_b = y_{cem} \cdot \phi + 0,4 y_{sca} \cdot \phi = 0,083 + 0,4 \cdot 0,012 = 0,088 \quad (D.6)$$

$$K_b = K_{cem} + 0,4 K_{sca} = 3,00 + 0,4 \cdot 0,285 = 3,114 \quad (D.7)$$

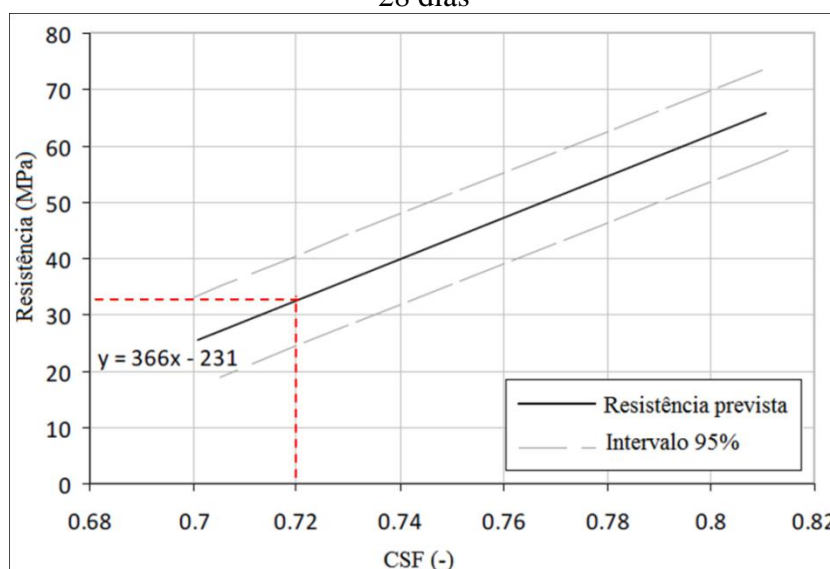
$$\varphi^*_b = \varphi_b \frac{1+K_b}{K_b} = 0,088 \frac{1+3,114}{3,114} = 0,116 \quad (D.8)$$

Feito isso, é necessário calcular o fator de espaçamento do cimento (*CSF*), que nesse caso irá considerar tanto o cimento como a sílica de casca de arroz, como demonstrado na Equação (D.9).

$$CSF = \frac{\varphi_{cem}}{\varphi^*_{cem}} \cdot \frac{\varphi_{mix}}{\phi} = \frac{\varphi_b}{\varphi^*_b} \cdot \frac{\varphi_{mix}}{\phi} = \frac{0,088}{0,116} \cdot \frac{0,844}{0,888} = 0,72 \quad (D.9)$$

Nota-se que o valor de *CSF* é superior ao limite de 0,70 fixado por Fennis (2011), o qual corresponde a uma resistência mínima de 25 MPa, aos 28 dias. Sendo assim, a previsão de resistência da mistura em questão será superior a 25 MPa. O valor aproximado da resistência pode ser obtido pelo gráfico da Figura D.1. Nesse exemplo, para um valor de 0,72 a resistência prevista é de **32,2 MPa**

Figura D.1 – Relação experimental entre o *CSF* e a resistência à compressão do concreto aos 28 dias



(Fonte: Adaptado FENNIS, 2011)

APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Os resultados dos ensaios mecânicos (resistência à compressão e à tração por compressão diametral) realizados para o concreto de referência (REF), concreto Ecológico A (ECO A) e concreto Ecológico B (ECO B), apresentados no Capítulo 4, seguem descritos nas Tabelas E.1 a E.8. Nas células destacadas estão apresentados os resultados considerados espúrios, após análise de desvio padrão, e foram excluídos da composição das médias.

Legenda para análise da tabela ANOVA: SQ representa a soma de quadrados; GDL são os graus de liberdade; MQ são as médias quadradas; Teste F é a distribuição F de Snedecor; F tabelado é o valor tabelado de F de Snedecor.

Tabela E.1 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão

Traços	7 dias			28 dias			63 dias		
	REF	ECO A	ECO B	REF	ECO A	ECO B	REF	ECO A	ECO B
Resistência à compressão (MPa)	24,7	38,8	18,0	35,1	52,6	26,7	38,8	63,4	40,3
	22,1	35,0	22,5	33,5	53,8	30,1	37,0	62,4	32,7
	22,4	40,6	21,6	35,8	53,1	32,0	37,6	66,6	32,9
	22,5	39,6		35,7	56,9		43,6	63,6	
		43,0		36,0	32,9			61,4	
Médias	22,4	39,4	22,1	35,2	54,1	31,0	37,8	63,5	32,8
Desvio padrão	0,22	2,91	0,67	1,02	1,89	1,38	0,92	1,96	0,1

Tabela E.2 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	892,1	2	446,1	80,8	4,3
Erro	49,7	9	5,5	80,8 > 4,3; há diferença entre grupos	
Total	941,8	11,0			
Limite de decisão	3,52				
Comparação REF – ECO A	16,44	>	3,52	Diferença significativa	
Comparação REF – ECO B	2,25	<	3,52	Estatisticamente equivalentes	

Tabela E.3 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	925,2	2	462,6	11,9	4,1
Erro	390,3	10	39,0	11,9 > 4,1; há diferença entre grupos	
Total	1315,5	12			
Limite de decisão	9,0				
Comparação REF – ECO A	14,65	>	9,0	Diferença significativa	
Comparação REF – ECO B	5,65	<	9,0	Estatisticamente equivalentes	

Tabela E.4 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão aos 63 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	1984,1	2	992,0	111,3	4,3
Erro	80,2	9	8,9	111,3 > 4,3; há diferença entre grupos	
Total	2064,3	11,0			
Limite de decisão	4,48				
Comparação REF – ECO A	24,23	>	4,48	Diferença significativa	
Comparação REF – ECO B	3,92	<	4,48	Estatisticamente equivalentes	

Tabela E.5 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Traços	7 dias			28 dias			63 dias		
	REF	ECO A	ECO B	REF	ECO A	ECO B	REF	ECO A	ECO B
Resistência à tração (MPa)	1,6	2,9	1,9	3,2	3,3	2,5	3,1	3,9	3,6
	2,3	2,8	1,7	2,6	4,4	2,9	2,6	3,3	2,9
	2,7	2,7	2,4	3,8	2,9	3,2	2,4	3,4	2,7
	2,0	3,3		2,7	3,7		2,9	2,9	
		2,9		3,0	4,3			4,0	
Médias	2,3	2,9	2,0	3,1	3,7	2,9	2,8	3,5	2,8
Desvio padrão	0,32	0,23	0,35	0,47	0,64	0,36	0,32	0,45	0,10

Tabela E.6 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à tração aos 7 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	2,1	2	1,0	9,3	4,3
Erro	1,0	9	0,1	9,3 > 4,3; há diferença entre grupos	
Total	3,1	11,0			
Limite de decisão	0,50				
Comparação REF – ECO A	0,77	>	0,50	Diferença significativa	
Comparação REF – ECO B	0,16	<	0,50	Estatisticamente equivalentes	

Tabela E.7 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à tração aos 28 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	1,6	2	0,8	2,9	4,1
Erro	2,8	10	0,3	2,9 < 4,1; não há diferença entre grupos	
Total	4,4	12,0			

Tabela E.8 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de resistência à tração aos 63 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	1,2	2	0,6	3,4	4,3
Erro	1,6	9	0,2	9,3 > 4,3; não há diferença entre grupos	
Total	2,8	11,0			

Os resultados dos ensaios de durabilidade (absorção de água por imersão e capilaridade, resistividade elétrica e velocidade de pulso de ultrassom) realizados para o concreto de referência (REF), concreto Ecológico A (ECO A) e concreto Ecológico B (ECO B), apresentados no Capítulo 4, seguem descritos nas Tabelas E.9 a E.24.

Tabela E.9 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para o concreto de Referência

REF	Leituras massas (kg)/ Tempo (h)							Índice de vazios (%)
	0	3	6	24	48	72	M _{72h(i)} *	
1	3,53	3,58	3,63	3,72	3,72	3,72	2,14	11,68
2	3,50	3,54	3,59	3,68	3,68	3,68	2,12	
3	3,52	3,57	3,62	3,70	3,70	3,70	2,14	
4	3,48	3,52	3,57	3,66	3,66	3,66	2,11	
Média (kg)	3,51	3,55	3,60	3,69	3,69	3,69	2,13	
Desvio padrão	0,022	0,028	0,028	0,026	0,026	0,026	0,015	
Absorção (%)	0,00	1,28	2,71	5,20	5,20	5,20	-	

M_{72h(i)}: massa do corpo de prova submerso

Tabela E.10 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para o concreto Ecológico A

ECO A	Leituras massas (kg)/ Tempo (h)							Índice de vazios (%)
	0	3	6	24	48	72	M _{72h(i)}	
1	3,84	3,86	3,88	3,93	3,93	3,93	2,33	5,55
2	3,82	3,84	3,86	3,90	3,90	3,90	2,32	
3	3,81	3,83	3,85	3,89	3,89	3,90	2,31	
4	3,82	3,84	3,86	3,91	3,91	3,91	2,33	
5	3,77	3,79	3,81	3,86	3,86	3,86	2,28	
Média (kg)	3,81	3,83	3,85	3,90	3,90	3,90	2,31	
Desvio padrão	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,025	0,021	
Absorção (%)	0,00	0,52	1,05	2,26	2,26	2,31	-	

Tabela E.11 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para o concreto Ecológico B

ECO B	Leituras massas (kg)/ Tempo (h)							Índice de vazios (%)
	0	3	6	24	48	72	M _{72h(i)}	
1	3,75	3,78	3,80	3,84	3,84	3,84	2,27	6,07
2	3,74	3,76	3,78	3,84	3,84	3,84	2,28	
Média (kg)	3,75	3,77	3,79	3,84	3,84	3,84	2,28	
Desvio padrão	0,007	0,014	0,014	0,000	0,000	0,000	0,007	
Absorção (%)	0,00	0,67	1,20	2,54	2,54	2,54	-	

Tabela E.12 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	20,4	2	10,2	581,2	4,46
Erro	0,141	8,0	0,018	581,2 > 4,46; há diferença entre grupos	
Total	20,6	10,0			
Limite de decisão	0,21				
Comparação REF – ECO B	2,67	>	0,21	Diferença significativa	
Comparação ECO B – ECO A	0,23	>	0,21	Diferença significativa	

Tabela E.13 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade para o concreto Referência

REF	Leituras massas (kg)/Tempo (h)					
	0	3	6	24	48	72
1	3,53	3,54	3,55	3,57	3,57	3,57
2	3,50	3,51	3,52	3,53	3,54	3,54
3	3,53	3,53	3,54	3,55	3,55	3,55
4	3,51	3,51	3,52	3,53	3,53	3,53
Média (kg)	3,518	3,523	3,533	3,545	3,548	3,548

Desvio padrão	0,015	0,015	0,015	0,019	0,017	0,017
Absorção (g/cm²)	0,00	0,06	0,19	0,35	0,38	0,38

Tabela E.14 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade para o concreto Ecológico A

ECO A	Leituras massas (kg)/ Tempo (h)					
	0	3	6	24	48	72
1	3,81	3,83	3,83	3,84	3,84	3,84
2	3,78	3,80	3,80	3,81	3,81	3,81
3	3,77	3,78	3,78	3,79	3,80	3,80
4	3,83	3,84	3,85	3,85	3,86	3,86
5	3,77	3,78	3,79	3,79	3,79	3,79
Média (kg)	3,792	3,806	3,810	3,816	3,820	3,820
Desvio padrão	0,027	0,028	0,029	0,028	0,029	0,029
Absorção (g/cm²)	0,00	0,18	0,23	0,31	0,36	0,36

Tabela E.15 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade para o concreto Ecológico B

ECO B	Leituras massas (kg)/ Tempo (h)					
	0	3	6	24	48	72
1	3,72	3,74	3,76	3,78	3,78	3,78
2	3,71	3,73	3,75	3,77	3,77	3,77
Média (kg)	3,72	3,74	3,76	3,78	3,78	3,78
Desvio padrão	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Absorção (g/cm²)	0,00	0,25	0,51	0,76	0,76	0,76

Tabela E.16 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	0,3	2	0,1	13,3	4,46
Erro	0,078	8,0	0,010	13,3 > 4,46; há diferença entre grupos	
Total	0,3	10,0			
Limite de decisão	0,15				
Comparação REF – ECO B	0,38	>	0,15	Diferença significativa	
Comparação ECO B – ECO A	0,02	<	0,15	Estatisticamente equivalentes	

Tabela E.17 – Resultados do ensaio resistividade elétrica para o concreto de Referência

REF	Leituras de resistividade (kΩ.cm)					Média (kΩ.cm)	Desvio padrão
7 dias	8,3	8,0	8,9	9,0	8,5	8,3	0,385
	8,2	8,2	8,3	8,9	7,8		
	8,2	7,8	8,2	8,5	7,9		
14 dias	9,6	9,2	10,6	9,7	9,6	9,7	0,448
	9,3	9,4	10,3	9,6	9,7		
	9,1	9,6	10,5	9,4	9,8		
28 dias	11,7	12,3	13,3	12,9	12,7	12,7	0,675
	12,7	12,0	14,6	12,7	12,5		
	12,2	12,2	12,9	12,3	12,8		
63 dias	12,2	12,7	12,6	13,4	12,8	13,2	0,578
	12,3	12,8	12,9	13,6	13,4		
	13,3	13,6	13,9	13,9	13,9		

Tabela E.18 – Resultados do ensaio resistividade elétrica para o concreto Ecológico A

ECO A	Leituras de resistividade (kΩ.cm)					Média (kΩ.cm)	Desvio padrão
7 dias	13,9	13,9	13,6	14,5	13,3	13,8	0,487
	13,5	14,2	13,9	14,9	13,4		
	13,8	13,8	13,9	14,1	12,9		
14 dias	22,1	21,8	22,4	22,4	22,3	22,3	0,832
	22,0	21,3	23,7	22,3	21,9		
	21,7	21,5	24,5	22,9	22,4		
28 dias	37,1	36,8	39,2	37,9	36,9	37,5	0,826
	38,8	36,6	38,0	37,3	37,6		
	36,9	36,1	37,6	37,5	38,1		
63 dias	53,5	51,8	52,7	53,1	51,9	52,6	0,661
	53,5	52,0	52,0	53,5	52,2		
	51,9	53,1	52,5	52,8	51,8		

Tabela E.19 – Resultados do ensaio resistividade elétrica para o concreto Ecológico B

ECO B	Leituras de resistividade (kΩ.cm)			Média (kΩ.cm)	Desvio padrão
7 dias	11,0	12,5	11,2	11,7	0,825
	12,0	13,0	12,4		
	10,8	10,9	11,1		
14 dias	18,9	19,1	18,8	19,2	0,207
	19,1	19,2	19,2		
	19,3	19,4	19,4		
28 dias	36,0	31,0	33,7	33,1	1,886
	34,3	30,5	32,8		
	35,2	31,7	32,3		
63 dias	63,1	59,8	58,3	60,6	1,681
	62,9	61,4	59,4		
	60,2	61,4	59,1		

Tabela E.20 – Resultados do ensaio de ultrassom para o concreto de Referência

REF	Leituras de velocidade de pulso (m/s)					Média (m/s)	Desvio Padrão	Módulo dinâmico (GPa)
7 dias	4668,0	4668,0	4630,0	4662,0	4662,0	4645,0	28,99	46,23
	4668,0	4668,0	4608,0	4587,0	4640,0			
	4668,0	4668,0	4608,0	4608,0	4662,0			
14 dias	4751,0	4717,0	4684,0	4717,0	4684,0	4722,5	23,90	48,04
	4717,0	4717,0	4751,0	4717,0	4751,0			
	4717,0	4751,0	4695,0	4751,0	4717,0			
28 dias	4535,0	4608,0	4556,0	4608,0	4505,0	4544,0	52,27	44,48
	4474,0	4608,0	4505,0	4608,0	4556,0			
	4505,0	4608,0	4505,0	4474,0	4505,0			
63 dias	4608,0	4608,0	4556,0	4662,0	4717,0	4626,5	48,09	46,11
	4608,0	4662,0	4556,0	4662,0	4662,0			
	4608,0	4662,0	4556,0	4608,0	4662,0			

Tabela E.21 – Resultados do ensaio de ultrassom para o concreto Ecológico A

ECO A	Leituras de velocidade de pulso (m/s)					Média (m/s)	Desvio Padrão	Módulo dinâmico (GPa)
7 dias	4662,0	4717,0	4608,0	4608,0	4662,0	4650,0	46,68	48,66
	4662,0	4717,0	4608,0	4608,0	4662,0			
	4662,0	4739,0	4587,0	4608,0	4640,0			
14 dias	4914,0	4950,0	5115,0	5115,0	4950,0	5031,3	85,57	57,32

	5051,0	4950,0	5141,0	4950,0	5115,0			
	5038,0	4975,0	5141,0	4950,0	5115,0			
28 dias	4796,0	4773,0	4831,0	4831,0	4831,0	4819,8	21,31	52,60
	4831,0	4831,0	4808,0	4831,0	4831,0			
	4831,0	4796,0	4860,0	4808,0	4808,0			
63 dias	5013,0	4950,0	5051,0	4808,0	5038,0	4985,3	109,97	56,42
	5038,0	4950,0	5141,0	4860,0	5038,0			
	4988,0	4975,0	5141,0	4751,0	5038,0			

Tabela E.22 – Resultados do ensaio de ultrassom para o concreto Ecológico B

ECO B	Leituras de velocidade de pulso (m/s)			Média (m/s)	Desvio Padrão	Módulo dinâmico (GPa)
Leituras	4950,0	4950,0	4831,0	4884,3	75,21	53,24
	4975,0	4831,0	4808,0			
	4975,0	4831,0	4808,0			
Leituras	5090,0	4870,0	5013,0	5090,0	102,10	57,82
	5090,0	5141,0	5090,0			
	5208,0	5190,0	5141,0			
Leituras	5141,0	5076,0	5076,0	5091,1	63,00	58,05
	5208,0	5013,0	5013,0			
	5141,0	5076,0	5076,0			
Leituras	5141,0	5013,0	5038,0	5105,7	64,01	58,38
	5168,0	5038,0	5168,0			
	5141,0	5076,0	5168,0			

Tabela E.23 – Tabela ANOVA para análise dos resultados do ensaio de ultrassom (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado	Comparações
Entre idades (A)	133,95	3	44,65	20,4	2,96	Efeito significativo
Entre traços (B)	717,01	2	358,50	163,9	3,35	Efeito significativo
Variação AB	75,92	3	25,31	11,6	2,96	Efeito significativo
Erro	59,06	27	2,19			
Total	985,95	35				

Tabela E.24 – Tabela ANOVA para análise dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 63 dias (95% confiabilidade)

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado
Entre traços	383,5	2	191,8	53,3	4,10
Erro	35,9	10	3,6	53,3 > 4,10; há diferença entre grupos	
Total	419,5	12,0			
Limite de decisão				2,73	
Comparação ECO B – ECO A	1,94	<	2,73	Estatisticamente equivalentes	
Comparação ECO A – REF	10,33	>	2,73	Diferença significativa	